

Rosana
del
Carmen
Hämmerly

VARIABILIDAD REGIONAL DE LOS
COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

UDC
2017

VARIABILIDAD REGIONAL DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

Rosana del Carmen Hämmerly

Tesis doctoral UDC / Año 2017

Directores: Óscar Carlos Duarte
Antonio Paz González

Tutor: Antonio Paz González



Programa de doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental



Variabilidad regional de los componentes del balance hídrico

Autora: Rosana del Carmen Hämmerly

Tesis doctoral UDC / Año 2017

Directores: Oscar Carlos Duarte

Antonio Paz González

Tutor: Antonio Paz González

Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Programa Oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental

Tesis Doctoral

Variabilidad regional de los componentes del balance hídrico

Rosana del Carmen Hämmerly
Abril 2017



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Los doctores **D. Oscar Carlos DUARTE**, Profesor de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER), Argentina, y **D. Antonio PAZ GONZÁLEZ**, Catedrático del Área de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de A Coruña (UDC), **AUTORIZAN** a **Dña. Rosana del Carmen Hämmerly** a presentar la memoria titulada “**Variabilidad regional de los componentes del balance hídrico**”, realizada bajo su dirección en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad del Litoral (FICH-UNL), Santa Fe, Argentina; la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Entre Ríos (UNER) y en el Laboratorio del grupo Agua y Suelo del Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA) de la Universidad de A Coruña (UDC) para optar al grado de Doctora por la Universidad de A Coruña.

Y para que así conste, a los efectos oportunos firmamos la presente en A Coruña, a 18 de abril de 2017.

Fdo.: Oscar Carlos Duarte

Fdo.: Antonio Paz González

Dedicatoria:

A mis hijos, por el esfuerzo de ser mis hijos, y a mi madre por el esfuerzo de haber sido mi madre.

Agradecimientos:

A mi director Antonio y a mi amiga Marta, mis dos pilares incondicionales en esta tesis.

A mi amiga Pamela por su generosidad en el conocimiento.

A mi amigo Cristian por su apoyo inquebrantable.

Por su preocupación en que alcance la meta, mi agradecimiento a Oscar, Carlos, Viviana, Valle y cuántos se interesaron y alentaron desde el conocimiento y el afecto.

RESUMEN

Actualmente para planificar y gestionar el territorio se requiere del conocimiento acabado de los recursos disponibles, siendo el agua uno de los más importantes. Para que las demandas de agua sean satisfechas, se requiere evaluar la asignación del recurso en tiempo y espacio. El balance hídrico permite conocer los volúmenes de agua disponibles para ser distribuidos en el tiempo. Además, es necesaria una amplia red de mediciones para cubrir una región, y aun así, posiblemente no será suficiente para describir adecuadamente el sistema. Existirán por lo tanto faltantes de información en tiempo y espacio, y que ya no podrán obtenerse por la observación o medición directa, pero que sí podrán ser inferidas por técnicas con base estadística.

En Argentina, en líneas generales, la precipitación anual disminuye de este a oeste y de norte a sur, esto da una idea de cómo varía en el espacio, además existen, según las regiones, períodos lluviosos o secos que indican la variabilidad temporal en el ciclo anual. Frente a condiciones de gran variabilidad interanual de las precipitaciones, una red poco densa de estaciones meteorológicas, y con gran proporción de registros cortos, como las existentes en Argentina, el desafío es cuál es el método más eficiente para considerar la variabilidad espacio temporal de las variables hidrológicas.

Los tradicionales métodos de promedios aritméticos de precipitaciones y ponderación con polígonos de Thiessen, han sido utilizados por años para el cálculo de la precipitación media areal de una cuenca. Surge entonces, la necesidad de estudiar, validar y difundir metodologías alternativas, que permitan estimar campos de precipitaciones y evapotranspiración más confiables y lograr mejores resultados en los balances.

El uso de técnicas de regionalización y de krigado de datos posibilita la obtención de campos de variables con distribución espacial que pueden representar su variación en el espacio. Asociar estos campos con la variación en el tiempo e introducirlos en los modelos de balances es el desafío. Pero ¿cuánto inciden estas variaciones en los resultados de los modelos?

El objetivo perseguido en esta tesis es el de incorporar las estimaciones de variabilidad de las componentes del balance hídrico para la determinación de la oferta de agua.

Se realiza en este trabajo la modelación en cuencas de Argentina dentro de Cuenca del Plata mediante el uso del programa CHAC basado en el método de Témez, e información hidrometeorológica proveniente de diversos organismos nacionales de Argentina vinculados a la gestión de los recursos hídricos. La modelación es a paso de tiempo mensual, para un período de 40 años, utilizando campos de precipitación y de evapotranspiración obtenidas por tres métodos distintos: el tradicional método de polígonos de Thiessen, métodos de regionalización y técnicas de kriging.

Se contrastan los caudales observados con los simulados empleando estas tres técnicas en 12 cuencas de la margen izquierda del río Paraná para analizar con cuál de ellas el ajuste con el hidrográfico observado en la sección de control cumple con el nivel de error adoptado.

Los resultados encontrados permiten destacar la importancia de contar con datos hidrometeorológicos uniformemente distribuidos en el espacio, recomendando una red densa

para minimizar los errores de interpolación. Estos datos puntuales, empleados en técnicas de geoestadísticas, permiten generar campos de precipitación y evapotranspiración. No obstante el uso de series de tiempo resulta irremplazable para la aplicación de métodos de balances.

El uso de modelos de balances a paso de tiempo mensual resulta suficiente para el conocimiento estacional de la oferta y una forma sencilla de cuantificarla. La oferta hídrica mensual estimada mediante balances hidrológicos resulta una valiosa herramienta al momento de planificar y gestionar las cuencas, en especial para la Cuenca del Plata que proporciona agua para usos tan variados como la navegación, agrícola, pecuario, humano, energético, industrial, pesquero, recreativo y como receptor de efluentes industriales y domésticos.

RESUMO

Actualmente para planear e xestionar o terreo é preciso o coñecemento profundo dos recursos dispoñibles, sendo a auga un dos máis importantes. Para que as demandas de auga sexan cumpridas é necesario avaliar a distribución do recurso no tempo e no espazo. O balance hídrico permite coñecer o volume de auga dispoñible ao longo do tempo. Ademais é necesaria unha rede de medicións para cubrir unha rexión, e aínda pode non ser suficiente para describir adecuadamente o sistema. Haberá, polo tanto, falta de datos que non están dispoñibles e que non poden ser obtidos por medición ou observación directa, pero que poden ser inferidos por medio de técnicas con base estatística.

En Arxentina, en termos xerais, a precipitación anual diminúe de leste a oeste e de norte a sur, o que dá unha idea de como varía no espazo. Tamén existen, dependendo das rexións, períodos de choiva ou secas que indican a variabilidade temporal no ciclo anual. Ante condicións de grande variabilidade interanual de choivas, unha rede de estacións meteorolóxicas escasa e gran proporción de rexistros de curta duración, como os de Arxentina, o reto é identificar o método máis eficaz para considerar a variabilidade espazo-temporal das variables hidrolóxicas.

Os métodos tradicionais, de medias aritméticas de precipitación e ponderación usando polígonos de Thiessen, foron usados durante anos para calcular a precipitación media areal para unha conca. Xorde entón, a necesidade de estudar, validar e difundir metodoloxías alternativas para estimar campos de precipitacións e evapotranspiración máis fiables e acadar mellores resultados nos balances. Usando técnicas de rexionalización e de kriging pódense obter campos de variables con distribución espacial que poden representar a súa variación no espazo. O reto é asociar estes campos coa variación no tempo e introducilos en modelos de balances. Pero cómo afectan estas variacións nos resultados dos modelos?

O obxectivo desta tese é incorporar estimacións de variabilidade das compoñentes do balance hídrico para a determinación da oferta de auga.

Realizouse a modelización de cuncas en Arxentina, na “Cuenca del Plata”, usando o programa CHAC baseado no método de Témez, ademais de información hidrometeorolóxica de varios organismos nacionais de Arxentina ligados á xestión dos recursos hídricos. A modelización é mensual para un período de tempo de 40 anos, usando campos de precipitación e de evapotranspiración obtidos mediante tres métodos diferentes: o método tradicional dos polígonos de Thiessen, o método de rexionalización e técnicas de kriging.

Contrastáronse os caudais observados cos simulados, mediante estas tres técnicas, en 12 concas da marxe esquerda do Río Paraná para analizar con cal delas o axuste do hidrograma observado na sección de control atende ao nivel de erro adoptado.

Os resultados atopados permiten salientar a importancia de posuír datos hidrometeorolóxicos uniformemente distribuídos no espazo, recomendando unha densa rede para minimizar os erros de interpolación. Estes datos puntuais usados en técnicas de Xeoestatística, permiten

xerar campos de precipitación e evapotranspiración, Nembargantes, o uso de series de tempo resulta irremplazable para a aplicación de métodos de balances.

O uso de modelos de balances con datos mensuais é suficiente para o coñecemento estacional da oferta e un xeito sinxelo de cuantificalo. A oferta hídrica mensual estimada mediante balances hidrolóxicos é unha ferramenta valiosa na planificación e xestión das concas, sobre todo para a “Cuenca del Plata”, que fornece auga para usos tan variados como navegación, agricultura, gandería, humano, enerxético, industrial, pesqueiro , recreativo e como receptor de efluentes industriais e domésticos.

ABSTRACT

Nowadays land planning and management requires a thorough knowledge of the available resources, and water is one of the most important natural resources. In order that water demands could be satisfied, there is a need to assess the allocation of these resource in time and space. The water balance method allows determining the volumes of available water that potentially may be distributed seasonally. However, accurate application of these methods requires a rather dense network of hydrometeorological measurements, so that in general the available information is not enough to adequately describe properly the study system. Most commonly, therefore, the preliminary information required to perform a water balance is scarce or lacking, both in space and time. In this way the information required, which is not available from direct measurements or synoptic observations can only be estimated in the best case using statistical methods.

It has been shown that in Argentina annual precipitation show diminution from east to west and from north to south, and this general rule gives an approximate idea spatial rainfall variation. Also according to the different geographical regions, rainy or dry periods indicate the seasonal variability in the annual cycle. Under conditions responsible for high variability of precipitations, networks of meteorological stations with, and with big proportion of short registers, like the existent in Argentina, the challenge is which is the most efficient method to consider the variability temporary space of the hydrological variables.

Traditional methods used for estimating precipitation, relying on averages obtained by the Thiessen polygon approach have been used in the past to assess the areal average precipitation of a basin. Subsequently, the need to study, validate and disseminate different alternative methodologies has been arisen; these should allow estimating areal precipitations and evapotranspiration rates in a more reliable manner and therefore it is expected to obtain better and reliable results in the components of the water balances.

The use of regionalisation techniques and kriging of point data allows to obtain fields of variables, which are associated to a given pattern of spatial distribution, and this pattern can be represented. The challenge lies in associate these spatial fields with time variations, using the spatial data sets as input in the models of water balance assessment. In other words, how big can be the effect of the spatial variability in the results provided by water balance models?

Therefore, the objective of this Ph. D. thesis was to incorporate the variability of the main components of the water balance for assessing the water availability status at the studied catchments.

The study has been carried out using the information available in various subcatchments of Rio de la Plata basin, using the CHAC model, which is based on the Témez method and the hydrometeorological information obtained from several national organisms of Argentina associated to management of water resources. Modelling has been performed on a monthly base and involved a total period of 40 years. Three different methods have been utilized to

obtain precipitation and evapotranspiration data sets as input data of the models, i.e., Thiessen polygons, regionalization and kriging techniques.

Stream flow estimated using the above mentioned three methods for 12 catchments located at the left bank of the Paraná river have been checked to analyse what is the method that provides most reliable data sets matching the measured hygrograms at the control section of the available stations, taking into account levels of error adapted.

The obtained results also clearly showed that recording data sets of hydrometeorological variables, which are uniformly distributed along the space, is very important for assessing the water balance and to minimise the errors of interpolation. Geostatistical techniques allow generation of precipitation and evapotranspiration from point data. Nevertheless the use of time series has been shown to be irreplaceable for the application of methods of balance.

Using balance models at the monthly time scale has been shown to be adequate to quantify the availability of water and to assess its seasonal occurrence. The monthly water availability estimated by means of hydrological balances has been found to be a valuable tool for scheduling and managing the studied basins, located within Rio de la Plata basin. This catchment provides water for a variety of uses, including navigation, agriculture, and human consumption, and husbandry, fisheries, energetic, industrial, and recreational and also plays a role as a receptor of industrial and domestic effluents.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ÁMBITO DE ESTUDIO.....	3
1.3.1. Cuenca del Plata.....	3
1.3.2. Territorio argentino en Cuenca del Plata.....	5
1.3.3. Características de los sistemas fluviales.....	7
1.3.4. Las cuencas y subcuencas superficiales, generalidades	11
1.3.5. Características de las áreas de aportes a la margen Izquierda del río Paraná	12
 2. METODOLOGÍA Y DATOS DISPONIBLES.....	 24
2.1. LOS BALANCES HIDROLÓGICOS.....	24
2.1.1. Tareas a llevar a cabo para la implementación de un balance	27
2.1.2. Estado del arte acerca de los balances hídricos	28
2.1.3. Modelo CHAC-Témez	31
2.1.3.1. Los archivos de entrada al modelo	34
2.1.3.2. Calibración y simulación del modelo.....	37
2.2. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAMPOS AREALES	42
2.2.1. Método de polígonos de Thiessen.....	44
2.2.2. Método de regionalización.....	45
2.2.3. Método de Kriging.....	50
2.2.4. Consideraciones en la aplicación de campos areales	52
2.3. FUENTES DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.....	54
2.3.1. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	54
2.3.2. Servicio Meteorológico Nacional.....	62
2.3.3. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.....	65
2.4. OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	68
2.4.1. Información referida a la topografía	68
2.4.2. Delimitación de cuencas y subcuencas	68
2.4.3. Información de suelo.....	69

3.	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO PREVIO DE LOS DATOS.....	74
3.1.	ANÁLISIS Y CONSISTENCIA DE INFORMACIÓN DE PRECIPITACIONES.....	74
3.1.1.	Distribución temporal de precipitaciones anuales	82
3.1.2.	Distribución en el año de precipitaciones mensuales	84
3.1.3.	Dobles masas de precipitaciones	85
3.1.4.	Análisis estadísticos de precipitaciones.....	85
3.2.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	89
3.3.	ANÁLISIS Y CONSISTENCIA DE INFORMACIÓN DE CAUDALES.....	94
3.3.1.	Anuarios de caudales.....	94
3.3.2.	Dobles masas de caudales	101
3.3.3.	Análisis estadísticos de caudales	101
4.	RESULTADOS DE CAMPOS AREALES, MODELACIÓN Y COMPARACIÓN CON MEDIDAS	104
4.1.	DETERMINACIÓN DE LOS CAMPOS DE PRECIPITACIÓN Y DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	104
4.1.1.	Método de polígonos de Thiessen.....	104
4.1.2.	Métodos de regionalización.....	111
4.1.3.	Método de Kriging.....	128
4.2.	BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL EN LAS SUBCUENCAS ARGENTINAS DE CUENCA DEL PLATA	134
4.2.1.	Aplicación del Modelo CHAC.....	134
4.2.2.	Comparación de modelaciones	141
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

ANEXOS

ANEXO I: Datos y tratamiento de la información

ANEXO II: Planos del área de estudio

ANEXO III: Resultados del Modelo CHAC utilizando campos de precipitación y evapotranspiración potencial mediante método de Thiessen

ANEXO IV: Resultados del Balance Hídrico Superficial utilizando campos de precipitación y evapotranspiración potencial mediante método de Thiessen

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.JUSTIFICACIÓN

Es común que se hable del cambio climático y asociarlo a toda variación meteorológica que se presente. El cambio climático se refiere, en forma simplificada, a los cambios que se producen en el clima a partir de cambios producidos por las actividades del hombre, fundamentalmente debidas al aumento de los gases de efecto invernadero. La variabilidad climática se refiere a las cambios naturales del clima, que conducen a la ocurrencia de años más lluviosos que otros, períodos de mayores lluvias y períodos de sequías que se van alternando. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la variabilidad del clima son las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados (IPCC, 2001).

Las características climáticas de una región están dadas por los patrones de temperatura, vientos, presión, precipitación, etc. (variables climáticas). Estos patrones no son uniformes en tiempo y espacio aún dentro de la misma región. Usualmente se registran variaciones temporales intra e interanuales y áreas geográficas con distintas condiciones o predominios.

El régimen hidrológico en cambio está definido por las características y variabilidad de los caudales de la cuenca. Esta es la respuesta que el sistema hidrológico procesa a partir de la entrada neta producida por el clima y que se expresa en el balance hídrico. Sin lugar a dudas la variación en tiempo y espacio de la precipitación y la temperatura, condicionan el régimen hidrológico. Las precipitaciones a su vez están fuertemente influenciada por la circulación atmosférica, tanto global como regional; mientras que la temperatura define los montos de evaporación y evapotranspiración, que determinan la entrada neta.

Un cambio en las variables hidrometeorológicas mencionadas, dan como respuesta variaciones en los caudales de salidas de una cuenca, y esta respuesta depende de las características de las mismas. Sin embargo la misma no es lineal, ya que las cuencas tienen una característica que se denomina elasticidad hidrológica y que es inherente a su naturaleza y a las actividades que sobre ella se desarrollan.

Actualmente para planificar y gestionar el territorio se requiere el conocimiento de los recursos disponibles, siendo el agua uno de los más importantes. Para que las demandas de agua sean satisfechas se requiere evaluar la asignación del recurso en tiempo y espacio. El balance hídrico permite conocer los volúmenes de agua disponibles para ser distribuidos en el tiempo. Pero en muchos sitios no se pueden calibrar métodos o modelos de balance a causa de la falta

de información, es por ello que los volúmenes de agua se estiman en ese caso en función del conocimiento aproximado del sistema físico. Si se logra comprender la variabilidad que presentan las componentes de entrada a los modelos de balances se habrá avanzado en el conocimiento de la variabilidad de los caudales.

En sintonía de lo manifestado se procede en este trabajo a evaluar cómo influye la información empleada para las estimaciones de caudales en función de la variabilidad que la misma pudiera presentar. En particular los campos de precipitación y de evapotranspiración involucrados en los balances hídricos superficiales.

Sin dejar de desconocer que existen varias fuentes de incertidumbre en el planteo de un balance hídrico, como las que refieren a la propia obtención de datos básicos, los métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), los diferentes modelos numéricos de balance, etc., debe reconocerse que la variabilidad regional (espacio-temporal) en las principales componentes de este balance (la precipitación y la ETP) se trasladan al caudal.

La hipótesis que sustenta esta investigación es que la variabilidad espacio-temporal de la precipitación y evapotranspiración es significativa para determinar la oferta de agua a partir del balance hídrico.

Las tareas de investigación realizadas para esta Tesis se enmarcan en el Proyecto de Investigación PI "Balance hídrico como herramienta de gestión" perteneciente al programa de CAI+D 2013 de la Universidad Nacional del Litoral (UNL). Algunos de los resultados logrados forman parte del informe "Balance hídrico superficial de la cuenca del Plata en territorio argentino" desarrollado desde el año 2012 hasta el 2014 y que fuera confeccionado para el "Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático" del Comité Intergubernamental de Cuenca del Plata (CIC-Plata).

1.2.OBJETIVOS

General: incorporar las estimaciones de variabilidad de las componentes del balance hídrico para la determinación de la oferta de agua.

Específicos: incrementar el conocimiento de las componentes a partir de la extensión del análisis regional y, contrastar los resultados con modelos de balance hídrico convencionales.

1.3. ÁMBITO DE ESTUDIO

El ámbito de estudio se corresponde con el sector argentino dentro de Cuenca del Plata, que comprende la porción noreste del país, un territorio muy extenso y de características tanto climáticas como hidrológicas diferentes. Tiene una superficie de un poco más de 900.000 km² y de importancia ambiental, social y económica relevante.

1.3.1. CUENCA DEL PLATA

La Cuenca del Plata es la quinta cuenca más grande del mundo y la segunda en importancia en América de Sur. Es compartida por cinco países: gran parte de Brasil; el suroeste de Bolivia; el este de Uruguay; todo el Paraguay y el norte y centro este de Argentina, con regiones como la Mesopotamia y la Pampa Húmeda, incluyendo también la Puna. Está formada por diversas subcuencas que se desarrollan en los cinco países de la cuenca (Figura 1).

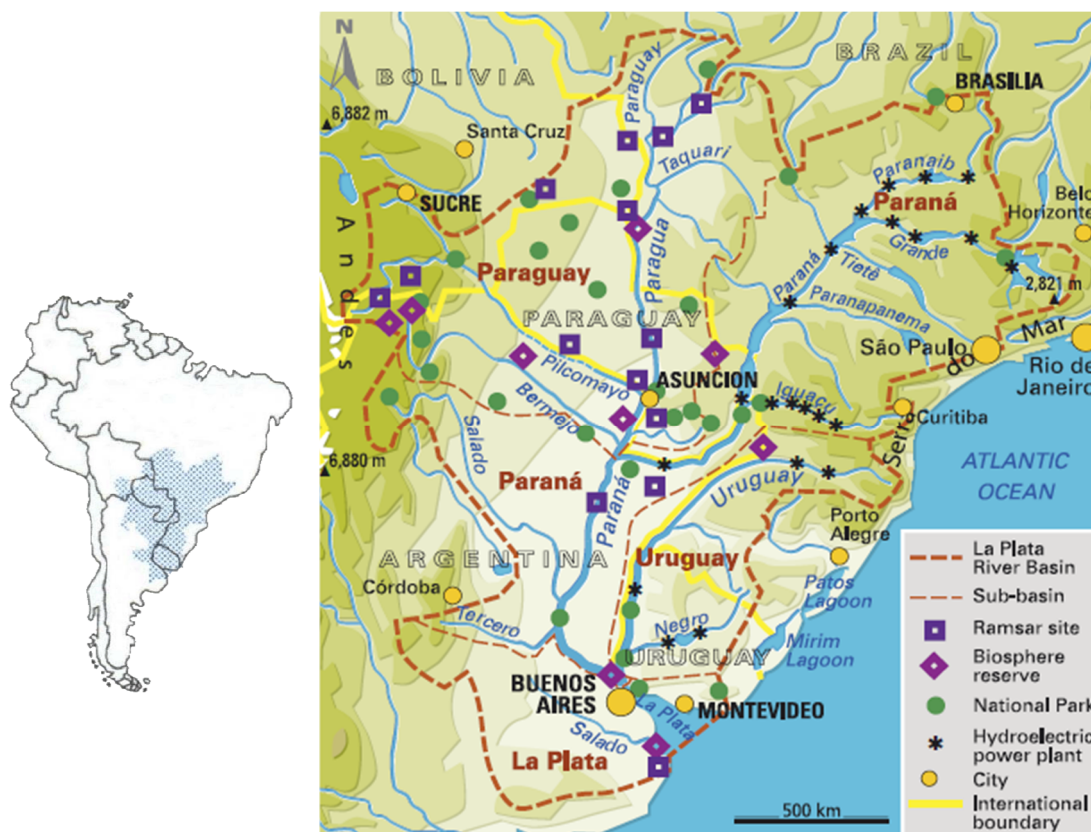


Figura 1. Cuenca del Plata

Tiene una superficie aproximada de 3.100.000 km², equivalente al 17 % de la superficie de América del Sur. La cuenca del Plata tiene una enorme importancia desde el punto de vista de la economía y también por los ecosistemas que incluye, ambos factores de suma importancia para el desarrollo regional. La mayor parte de esta área de drenaje se encuentra en Brasil, donde alcanza 1.415.000 km², luego le sigue la Argentina, 920.000 km², Paraguay, 410.000 km², Bolivia, 205.000 km² y Uruguay 150.000 km² (Tabla 1).

Tabla 1. Superficies y porcentajes de la Cuenca del Plata por países y subcuencas.

País	Cuenca del Paraná	Cuenca del Paraguay	Cuenca del Uruguay	Superficie que cubre la cuenca en cada país (*)
Argentina	565.000 km ² 37.5 %	165.000 km ² 15.0 %	60.000 km ² 16.4 %	920.000 km ² 29.7 %
Bolivia	--	205.000 km ² 18.7 %	--	205.000 km ² 6.6 %
Brasil	890.000 km ² 59.0 %	370.000 km ² 33.9 %	155.000 km ²	1.415.000 km ² 45.7 %
Paraguay	55.000 km ² 3.5 %	355.000 km ² 32.4 %	--	410.000 km ² 13.2 %
Uruguay	--	--	150.000 km ² 41.1 %	150.000 km ² 4.8 %
Total	1.510.000 km ² 48.7 %	1.095.000 km ² 35.3 %	365.000 km ² 11.8 %	3.100.000 km ² 100 %

(*) Las áreas de esta columna no incluyen la superficie del estuario del río de la Plata de 130.000 km², que se divide entre Argentina y Uruguay. Fuente: Barros V, R Clarke, P Silva Días, 2006.

En referencia a la producción y la economía, en la Cuenca del Plata se asienta una población de más de 120 millones de personas, la más importante del MERCOSUR, donde la producción de granos supera los 100 millones de toneladas anuales, siendo la agricultura la base de la alimentación de estos países. Pero también se desarrollan otras actividades igualmente rentables como la ganadería, industrias, forestales, turismo, pesca, minería, y generación de energía hidroeléctrica. En ella se produce el 70% del Producto Bruto Interno (PBI) total de los cinco países combinados. También coopera con la economía el transporte fluvial, que se da en algunos tramos de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay. Estas importantes vías de comunicación han permitido el comercio, integrando las economías regionales. Actualmente se pueden navegar unos 2000 km por el río Paraná (desde San Pablo hasta Ciudad del Este), unos 1300 km por el río Paraguay (desde el Río Apa hasta Cáceres) y unos 500 km por el Río Uruguay (desde el Río de la Plata hasta la ciudad de Salto).

También contribuyen con la economía la generación de energía a través de centrales hidroeléctricas. Existen en Brasil 69 represas, resultando el 92% de la energía consumida por ese país. Le siguen Paraguay, Argentina y Uruguay. La suficiencia que da autoabastecerse de energía asegura la posibilidad de desarrollo de los países.

En el centro de la cuenca del Plata se encuentra uno de los humedales más importante del mundo, "El Pantanal". Este inmenso ecosistema de 210.000 km² de extensión es el hábitat de

numerosas especies endémicas y exóticas. Es un reservorio de enorme riqueza biológica que además actúa como regulador de los sistemas climáticos e hidrológicos de la cuenca. Tiene características singulares dado que en época de lluvias se convierte en un inmenso cuerpo de agua donde viven 650 especies de aves, 80 de mamíferos, 50 de reptiles, más de 400 especies de peces y miles de cabezas de ganado vacuno. Las funciones que este humedal ofrece son esenciales para la salud del sistema acuático, como por ejemplo la purificación del río Paraguay de los metales pesados que le entran de la industria minera, o la mitigación de los efectos de las inundaciones durante las lluvias estacionales, actuando como un regulador de los caudales agua abajo.

La hidrografía de la cuenca del Plata se encuentra conformada por tres grandes sistemas hídricos: el Paraná, el Paraguay y el Uruguay (Tabla 2). El río Paraguay es afluente del Paraná, y este último junto con el Uruguay concurren a formar el Río de la Plata. La Cuenca del Plata descarga por este río hacia el Océano Atlántico un caudal medio de aproximadamente 27.000 m³/s. En la Tabla 2 se muestran las características de los tres ríos más importantes de la cuenca del Plata. El régimen de estos ríos, difiere sustancialmente del de sus afluentes no sólo por la magnitud sino también por sus características propias (Paoli et al., 2000).

Tabla 2. Características principales de los ríos de la Cuenca del Plata.

Río	Trecho	Distancia a naciente (km)	Área de la cuenca (10 ³ km ²)	Caudal medio anual (m ³ /s)
Paraná	Confluencia Paranaíba-Grande	1200 (Paranaíba) 1000 (Grande)	376	4370
	Desembocadura de río Paraguay	2540	975	12480
	Desembocadura en río de la Plata	3780	1510	17700
Paraguay	Hasta Cáceres	420	33.8	345
	Hasta Puerto Bermejo	2620	1095	3840
Uruguay	Concordia	--	294	4640
	Desembocadura en río de la Plata	1600	365	5500

Fuente: Barros V, R Clarke, P Silva Días, 2006.

1.3.2. TERRITORIO ARGENTINO EN CUENCA DEL PLATA

En territorio argentino, la cuenca del Plata se conforma con dos grandes sistemas hídricos, la cuenca del río Paraná, que a su vez tiene de afluente al río Paraguay, y la cuenca del río Uruguay, que confluye con el primero para conformar el río de la Plata. Asimismo y por margen derecha se dispone del área de aportes de los ríos y arroyos de la provincia de Buenos Aires

que vierten directamente al río de la Plata. La Figura 2 muestra el área correspondiente al sector argentino en Cuenca del Plata.

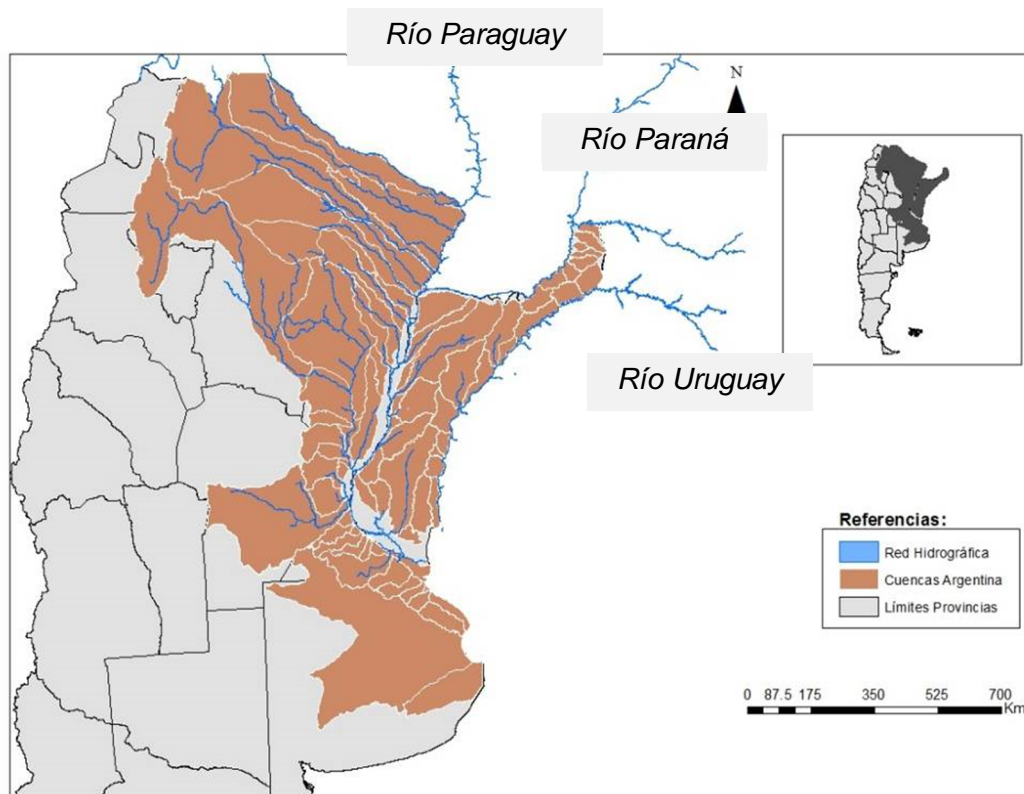


Figura 2. Cuencas de la República Argentina dentro de Cuenca del Plata.

La importancia de conocer la oferta hidrológica en sus cuencas radica en la necesidad de planificar y gestionar los recursos en particular el agua. Algunas de las cuencas de Argentina dentro de la Cuenca del Plata cuentan con caudales observados, ya sea en su desembocadura o en secciones de control aguas arriba, lo que permite la confección de curvas de duración de caudales, de suma utilidad para la planificación de diferentes usos, observándose el tiempo promedio en el cual estarán disponibles escurrimientos superiores a los caudales requeridos. Dicho de otro modo relaciona el caudal (o nivel) de un río y la permanencia en el tiempo en que el caudal es mayor o igual al valor especificado.

Es por ello que en las áreas de aportes donde no se conoce el escurrimiento, es necesario estimar la oferta hídrica por algún método, como por ejemplo la regionalización de caudales que permita simular caudales en cuencas no aforadas o parcialmente aforadas.

Este fue uno de los objetivos del estudio presentado en el informe "Balance hídrico superficial de la Cuenca del Plata en territorio argentino" (Hämmerly et al., 2014) que sirvió de base a este trabajo de tesis y del cual se toman como antecedentes muchas de las tareas realizadas para la

modelación en un total de 68 cuencas de las cuales 32 no contaban con aforos y a las que se aplicó una técnica de regionalización.

1.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS FLUVIALES

En la Figura 2 se observan los sistemas fluviales de Cuenca del Plata en Argentina, donde las mayores disponibilidades hídricas de la zona, se originan en áreas de aportes externas al país. A continuación se realiza una somera descripción de los mismos, que ha sido extraída del informe final “Identificación de potenciales nuevas áreas de regadío y áreas de riego complementario en las cuencas de la zona nordeste de Argentina” confeccionado por Cacik y Hämmerly, en 2013 para la Organización de Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO).

“El **río Paraguay** presenta un área de 1.095.000 km², de los cuales una tercera parte se ubica en Brasil, otra fracción similar corresponde a Paraguay y el resto a Bolivia y Argentina, correspondiendo en esta última un área de 165.000 km².

La cabecera de la cuenca brasilera – paraguaya, se extiende por una inmensa llanura de características aluviales, de escasa pendiente y extensas planicies de inundación que produce importantes regulaciones naturales de los caudales, retrasando en el tiempo los mismos.

Los derrames de éste río en territorio argentino están claramente gobernados por los aportes que se producen aguas arriba, fuera del territorio nacional. El caudal medio al ingresar a territorio argentino es de 3924 m³/s (en el período 1970/71 – 2011/12), siendo su principal afluente en margen argentina el río Bermejo (460 m³/s en El Colorado). En la estación Puerto Bermejo, antes de su ingreso al río Paraná se estima un caudal anual de 4700 m³/s.

El río Bermejo presenta dos afluentes principales, el Bermejo superior que nace en Bolivia y tiene un área de cuenca hasta Pozo Sarmiento de unos 23.900 km², y el río San Francisco que nace en la prepuna de la provincia de Jujuy con el nombre de río Grande hasta su confluencia con el río Lavayén donde cambia el nombre a San Francisco, descargando sus aguas en el río Bermejo (aguas abajo de la estación Pozo Sarmiento). El cauce del río principal atraviesa sectores de climas muy diferenciados, con precipitaciones anuales que apenas llegan a los 200 mm en los sectores de prepuna hasta más de 1200 mm en las serranías que flanquean este río. Los caudales mensuales máximos se producen en los meses de febrero – marzo. Si se suman los caudales medios anuales del Bermejo Superior y del San Francisco, se tiene un caudal de 542 m³/s, mayor al observado en El Colorado, mostrando de esta manera que se desarrolla aguas debajo de la cuenca superior un sector de derrames laterales, con pérdidas de caudal en el curso principal.

Otro afluente relevante es el río Pilcomayo, pero éste llega al río Paraguay solamente a través de los derrames que se producen aguas abajo de la estación Misión La Paz, hacia los bañados y zonas deprimidas de Paraguay y Argentina. A través de los mencionados bañados, lagunas y esteros, se produce un lento movimiento estacional de las aguas hacia el Este, que alimentan posteriormente las cabeceras de los riachos Porteño, El Salado, Pavao, y otros en la provincia de Formosa como Tatú Piré, Saladillo y He-He, entre los principales. El río Pilcomayo Inferior nace a la altura de la localidad paraguaya de General Delgado; difiere totalmente del Pilcomayo Superior y no tiene conexión física actual con él; posee un cauce bien definido, con menor caudal y mayor estabilidad, acarrea escasos sedimentos y drena únicamente las aguas de escorrentía producto de las lluvias de verano en su cuenca de aporte, así como las aguas freáticas.

El régimen de estos ríos en sus cuencas superiores es marcadamente estacional, con máximos durante el verano y principios de otoño siguiendo el régimen pluviométrico.

La cuenca del **río Paraná**, sin contar al río Paraguay, abarca un área de 1.510.000 km², con unos 945.000 km² fuera de territorio argentino. El Paraná Superior se encuentra en Brasil, siendo luego límite argentino – paraguayo tras recibir al río Iguazú. El río Iguazú se desarrolla principalmente en territorio brasilero y le aporta al río Paraná un caudal anual de 1720 m³/s, siendo además muy relevante sus aportes de crecidas.

Aguas arriba de la localidad de Ituzaingó, en la provincia de Corrientes, se ubica la represa hidroeléctrica de Yaciretá, la cual si bien es relevante para la generación energética, no tiene volumen suficiente como para producir alteraciones en el régimen hidrológico anual del río.

En Itatí, antes de recibir al río Paraguay, el río Paraná tiene un caudal anual de unos 13900 m³/s (serie 1970/71 – 2011/12) y en la estación Corrientes (luego de recibir los aportes del río Paraguay) presenta un caudal de 18980 m³/s manteniéndose prácticamente constante hacia aguas abajo (en la sección Paraná – Santa Fe se estima un caudal anual de 19000 m³/s).

Nuevamente se observa que derrames de éste río en territorio argentino están gobernados por los aportes que se producen aguas arriba, fuera del territorio nacional, presentando baja incidencia los aportes de afluentes en territorio argentino. Dichos bajos aportes se deben a los menores montos relativos de precipitaciones (decreciendo de este a oeste) y a las menores pendientes de terreno existentes. Solamente en la provincia de Misiones se tiene una orografía relevante, mientras que en su mayor proporción las cuencas de aportes son típicamente de llanuras con gran capacidad de almacenamiento superficial y baja escorrentía.

Los aportes provenientes de margen izquierda presentan divisorias mejor definidas, que permiten evaluar en forma diferenciada los aportes superficiales. De norte a sur, los aportes

más sobresalientes son los de los ríos Uruguay-I, Piray Mini, Piray Guazú, Paranay, A° Riachuelo, A° Empedrado, San Lorenzo, Santa Lucía, río Corriente, Guayquiraró, Feliciano, Las Conchas, A° Nogoyá y río Gualeguay.

Los aportes de margen derecha en las provincias de Chaco, Santiago del Estero y Santa Fe presentan en muchos casos divisorias de cuencas indefinidas, con particularidades en la dinámica de escurrimiento según el estado hídrico. En situaciones de aguas bajas existe escurrimiento con un grado importante de independencia, con áreas de almacenamiento que colectan los excedentes de lluvia de su zona de influencia, actuando como cuencas cerradas o de muy baja transfluencia. En situación de aguas altas se produce interconexión de áreas de aporte dando lugar a escurrimientos mantiformes y encauzados gobernados por la pendiente regional, con desagüe en el valle aluvial del río Paraná. Es por ello que en esta zona, en muchas ocasiones sólo se identifican cursos que son efluentes de grandes sistemas y no comprenden las denominadas cuencas típicas. También es de destacar la presencia de numerosas canalizaciones para el drenaje de inundaciones, que en ocasiones provocan transfluencia de cuencas.

De norte a sur, los principales aportes por margen derecha al río Paraná son: el río Negro, el A° Tapenagá, A° El Rey, A° Los Amores, A° Malabrigo, A° Saladillo Dulce y Amargo, río Salado, A° Colastiné, A° Monje, río Carcarañá, A° Saladillo, A° Pavón, A° del Medio, río Arrecifes.

Merece destacarse por su longitud y particularidades el río Pasaje – Juramento – Salado. Este río nace en la provincia de Salta, y en su cuenca superior ha sido regulado con la finalidad de riego principalmente, a partir de la presa de Cabra Corral, y aguas debajo de El Tunal. A partir de estas regulaciones, se tienen aprovechamientos de riego en Salta y el norte de la Provincia de Santiago del Estero. Ya con el nombre de Salado ingresa a la provincia de Santiago del Estero, y según las mediciones de los últimos años, con un régimen permanente con relativa escasa variación en el año. En Canal de Dios, tiene un caudal anual de unos 20 m³/s. En su tránsito hacia el sur existen otros aprovechamientos del río, disminuyendo paulatinamente el caudal medio del mismo, estando el último aprovechamiento relevante en Colonia Dora (Santiago del Estero), donde existe un azud derivador y actualmente está en construcción una pequeña presa para obtención de agua con fines de consumo humano en Tostado (Santa Fe). A partir que ingresa a la provincia de Santa Fe, en proximidades de la localidad de Tostado, se lo conoce como Salado Inferior. Desde allí escurre en dirección noroeste – sureste por un cauce con escasa capacidad de conducción hasta recibir los aportes del río Calchaquí el cual drena las aguas de la región denominada “Bajos Submeridionales”, una extensa zona de muy escasa pendiente que abarca el noroeste de Santa Fe y porciones de las provincias de Santiago del Estero y Chaco. Luego el cauce escurre en dirección norte – sur hasta llegar al río Paraná, al sur de la ciudad de Santa Fe, con un caudal medio anual de 159 m³/s (1970/71 – 2011/12). Por lo tanto el escurrimiento en la cuenca inferior del río Salado se compone de los

aportes de la cuenca media que son de baja o nula significación, de los aportes del río Calchaquí y de los excesos de lluvias de las subcuencas intermedias.

El **río Uruguay** nace también en territorio Brasileiro, siendo luego divisoria entre los países de Argentina y Brasil y posteriormente entre Argentina y Uruguay. En El Soberbio tiene un caudal anual de 2370 m³/s, que aumenta a 3100 m³/s en Garruchos y a 4730 m³/s en Paso de Los Libres, debido fundamentalmente a los aportes de margen izquierda (brasileira – uruguaya), llegando a unos 5700 m³/s en Concordia (Entre Ríos). Inmediatamente aguas arriba de Concordia se desarrolla la represa hidroeléctrica de Salto Grande, la cual si bien es relevante tanto para la generación energética como para la amortiguación de crecidas, no tiene volumen suficiente como para producir alteraciones en el régimen hidrológico anual del río.

La cuenca puede dividirse en diferentes porciones:

La Cuenca Alta abarca desde las nacientes (en la confluencia de los ríos Pelotas y Canoas), hasta la provincia argentina de Misiones con un área de aportes de 75.000 km² en la desembocadura del Río Pepirí-Guazú. Es la región con mayores precipitaciones (que llegan a ser superiores a 2000 mm/año), y al tener pendientes elevadas y suelo somero, origina hidrogramas de crecidas con rápidas subidas y altos caudales máximos.

La Cuenca Media considerada hasta la ciudad de Paso de los Libres, con unos 125.000 km², donde el relieve tiene menor pendiente relativa, adquiriendo características diferenciadas la margen izquierda de la derecha o argentina (donde las pendientes son aún menores). Desde la margen izquierda resultan importantes los aportes de los ríos Ijuí, Piratíní e Ibicuí.

La Cuenca próxima al embalse de Salto Grande, abarca los aportes desde Paso de los Libres hasta la represa, incluyendo los ríos y arroyos que desembocan directamente en el lago. El relieve es ondulado, con un suelo de baja permeabilidad que presenta afloramientos basálticos, lo cual sumado a tormentas de alta intensidad frecuentes en la región origina la posibilidad de tener hidrogramas con grandes caudales. Nuevamente los ríos afluentes de mayor relevancia son los de margen izquierda, como por ejemplo el Cuareim (límite uruguayo – brasileiro).

La Cuenca Inferior, corresponde al área de aportes desde la ubicación de la presa hasta la desembocadura en el Río de la Plata. Por la margen derecha, el río de mayor relevancia es el Gualaguaychú (6.980 km²), con unos 15 m³/s de caudal medio, mientras que en la margen izquierda el afluente más importante es el río Negro.

A lo largo del año, las precipitaciones son de carácter irregular, lo cual conforma el régimen eminentemente irregular del río. No obstante, se puede observar (en el sector argentino-uruguayo) un aumento de caudales en invierno y hasta octubre, con bajantes en el período estival, destacándose que las crecidas pueden ocurrir prácticamente en cualquier mes del año".

1.3.4. LAS CUENCAS Y SUBCUENCAS SUPERFICIALES, GENERALIDADES

En el informe “Balance hídrico superficial de la Cuenca del Plata en territorio argentino” se presenta el balance hídrico superficial de las áreas de aportes de los ríos Paraná y Uruguay. Se consideraron las cuencas en regiones, teniendo en cuenta sus aportes a los cursos principales y contemplando tanto las características topográficas y generales de las mismas, como características hidrometeorológicas, de suelo, cobertura, y la cantidad de estaciones de caudal disponibles en cada región. Se detallan a continuación las agrupaciones realizadas:

- Aportes a la margen derecha del río Paraguay
- Aportes a la margen derecha del río Paraná
- Aportes a la margen izquierda del río Paraná
- Aportes a la margen derecha del río Uruguay

La Figura 3 muestra las cuencas con registros de caudales en la porción argentina de Cuenca del Plata. Cabe aclarar que se han excluido las cuencas compartidas con otros países.

Se aclara, que en la presente tesis se va a limitar el análisis a las cuencas que aportan al río Paraná por margen izquierda. El comportamiento de las mismas se corresponde con el de cuencas de drenaje típico donde los escurrimientos suceden por gravedad y posibilita que la modelación sea más representativa. En cambio las cuencas de la margen derecha, por ejemplo, poseen cierta complejidad en su funcionamiento hidrológico, en parte por las características del terreno, con tendencia al almacenamiento, y en parte por las intervenciones antropológicas a las que están sujetas, lo que desvirtúa el comportamiento natural de las mismas a través de la simulación.

Se describen las características del área de aporte a la margen izquierda del río Paraná, las cuencas y subcuencas que la componen con indicación de aquellas que poseen medición de caudales y la forma como se agrupan las áreas de aporte sin mediciones o aquellas que aunque tengan mediciones, son muy pequeñas para un tratamiento individual.

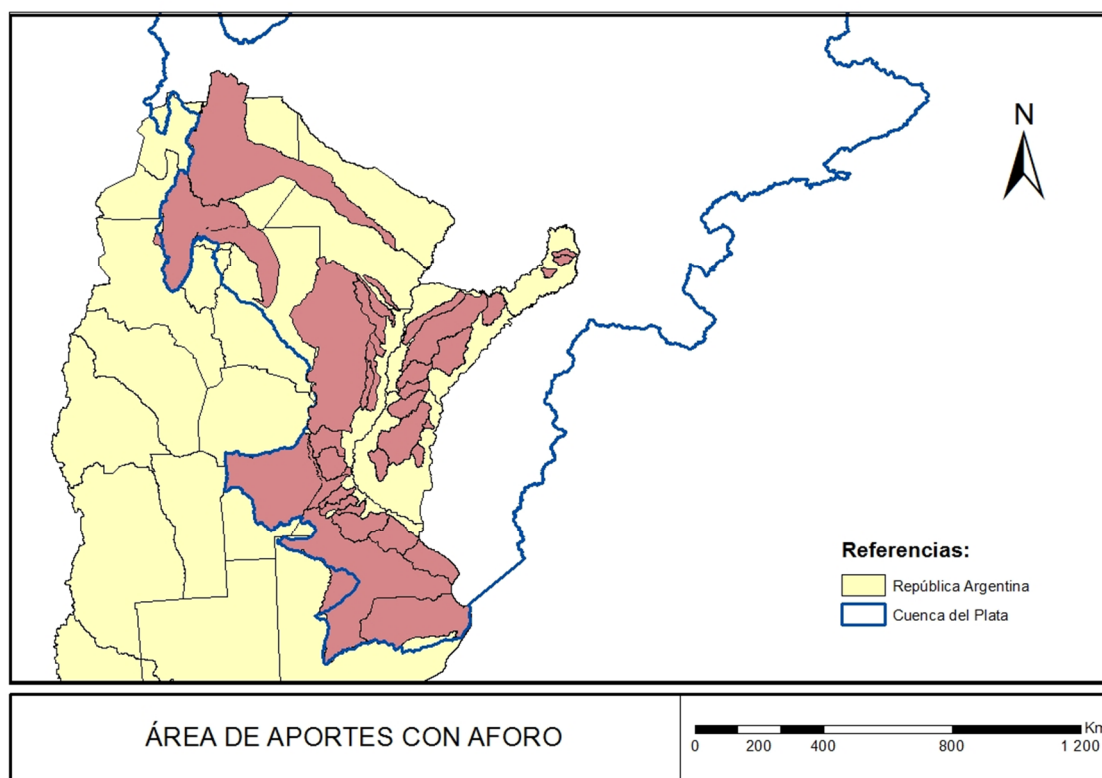


Figura 3. Cuencas con información de caudales dentro de Cuenca del Plata Argentina.

1.3.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS ÁREAS DE APORTES A LA MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO PARANÁ

La información expresada en este apartado ha sido extraída de la publicada por la Subsecretaría de los Recursos Hídricos de la Nación en su página Web: “Sistema Nacional de Información Hídrica”, la cual se considera un valioso aporte y que sirve de base para la mayoría de los estudios hidrológicos de las cuencas Argentina.

Aportes a la margen izquierda del río Paraná entre el ingreso a territorio argentino y Corrientes

En relación a las cuencas de Misiones que aportan al río Paraná, las mismas se caracterizan por tener arroyos que no superan los 75 km de extensión. Estos arroyos nacen en las sierras, que con dirección norte – sur, atraviesan la provincia de Misiones y sirve de límite entre los arroyos que fluyen hacia el Paraná y los que se dirigen hacia el Uruguay. Existe una gran densidad pluviográfica a razón del clima húmedo y los accidentes del relieve. Las condiciones geográficas presentes en la cuenca son favorables para la escorrentía y así trasladarse al coeficiente de drenaje que puede ser muy elevado. Gran cantidad de agua es restituida a la atmósfera por el proceso de transpiración de las plantas que abundan en la zona.

El relieve hidrográfico ha sido afectado por la erosión fluvial. Algunos autores afirman que todavía no ha llegado a su perfil de equilibrio y prueba de ellos son la gran cantidad de rápidos y cascadas presentes en esta cuenca, sobre todo en la zona norte. La erosión fluvial retrógrada ha conseguido una situación de homogeneidad entre los arroyos afluentes del río Paraná: en los primeros 5 a 10 km el gran emisario influye sobre la desembocadura del arroyo, luego se adentra en un cañón zigzagueante y estrecho de características rocosas; la zona del cañón puede extenderse hasta unos 70 km y la pendiente media del lecho ronda el 1 por mil. Aguas arriba nos encontramos con rápidos y pequeñas cascadas hasta alcanzar la cota sobre la meseta superior.

Entre los principales arroyos y ríos de esta cuenca se pueden mencionar el río **Urugua-í**, o también conocido como Marimbas, que nace al pie de la sierra Victoria. Sobre el arroyo Urugua-i, al norte, se encuentra un embalse que se ubica a 197 msnm. El principal objetivo de la obra es la producción de energía que se estima en 355 GWh anual. También sirve al control de inundaciones en el área.

El arroyo **Aguaray-Guazú** nace en la meseta localizada al sur de la sierra Morena y luego se une al Aguaray-Miní. El arroyo Aguaray-Miní y Yacutinga corren paralelos al Aguaray-Guazú y tienen un corto recorrido, 10 y 15 km respectivamente.

El **Piray-Guazú** es uno de los ríos interiores de Misiones de mayor longitud, recibe gran cantidad de aporte de pequeños arroyuelos y al sur de la Ruta Prov. 12 recibe al arroyo **Mborá** para luego desembocar en el Paraná, al norte de Puerto Piray.

El arroyo **Paranay-Guazú** nace en las sierras frente a Fracrán uniéndose luego con el arroyo Victoria, después de la unión corre en sentido noroeste y desemboca en el Paraná junto a Puerto Paranay.

Otro arroyo importante de esta cuenca es el **Yabebiry** que nace cerca de la población de Oberá y una vez que se une al arroyo Chapá desemboca en el arroyo Encantado, así unidos, y con el nombre de Yabebiry, cobra un fuerte grado de tortuosidad recibiendo el aporte del arroyo Mártires por la margen izquierda y por la derecha recibe al Cazador-Horqueta, desemboca luego en el Paraná 5 km al sur de San Ignacio.

El arroyo **Agrupa** nace en la sierra de San José y fluye hacia el norte donde se une al arroyo Quintana y Durazno en la Ruta 14, por la margen derecha recibe al arroyo Liso proveniente de Campo San Juan en las sierras del Imán o Itacuará; aguas abajo recibe al arroyo Tacuaruzú, bordea las cuchillas de San Cristóbal y se une al arroyo Pindapoy Grande para luego desembocar en el Paraná.

Se tiene registro de la existencia de más de 300 saltos entre los que se encuentran el salto Alegría y Berrondo.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH) cuenta con tres estaciones hidrométricas en la cuenca. Ellas son la estación El Alcázar sobre el río Paranay, Pinar Ciba sobre el río Piray Guazú y la estación Valle Hermoso sobre el Piray Miní. Luego existen dos estaciones que se encuentran sin actividad y son Puente Viejo Ruta Provincial N°12 sobre el Uruguayí y C. Mártires sobre el Yabebirí.

Para el cálculo del balance las cuencas consideradas son:

- Ca. A° Uruguayí y otros
- Ca. A° Aguaray Guazú
- Ca. A° Piray Miní
- Ca. A° Piray Guazú
- Ca. A° Paranay
- Ca. A° Guadalupe y otros
- Ca. Yabebirí y otros

Aportes a la margen izquierda del río Paraná entre Corrientes y Esquina

Pertenecen al sector noroccidental de esta provincia, con aportes al río Paraná, cuencas con un chato relieve interrumpido por suaves y elongadas lomadas arenosas que no superan la decena de metros de altura y que en su tope poseen cuerpos lagunares de variada forma y dimensiones. La red hídrica posee escaso desarrollo y se desdibuja hacia las cabeceras dificultando el trazado de la divisoria topográfica. Es común la presencia de bañados, lagunas y esteros, que hacia sus desembocaduras se canalizan y forman arroyos con los que se relacionan difusamente.

Predominan los suelos del orden de los alfisoles con presencia de entisoles en las lomadas arenosas y al tipo molisoles se los asocia a los valles fluviales. La vegetación dominante es de parques y sabanas. La especie arbórea característica es el quebracho, que ha sido muy explotado. Asociada a cursos, lagunas, bañados y esteros se encuentra vegetación palustre y acuática, en tanto que en los interfluvios se desarrollan espartillares.

Se destacan en este sector noroeste de la provincia de Corrientes, las cuencas de los arroyos ***Empedrado y Riachuelo***, observándose en el último la presencia de los esteros homónimos, con grandes ambientes acuáticos.

Lindante a esta región se encuentran cuatro regiones hídricas identificadas como Santa Lucía, Iberá, Batel-Batelito y Corriente, que con escurrimiento regional noreste-sudoeste desaguan en el río Paraná. La diferenciación en varias unidades hídricas obedece al patrón de drenaje mayoritariamente observado, bajo el entendimiento que ante situaciones hidrológicas de aguas altas las divisiones pierden validez, pudiendo comportarse como una única unidad hidrológica. Se señala una interconexión entre las regiones hídricas Santa Lucía y Corriente, siendo este último la vía de descarga de los esteros del Iberá, y Batel- Batelito,

La cuenca del río **Santa Lucía**, atraviesa diagonalmente la provincia de Corrientes, con sus extremos en contacto con el área drenada por el río Paraná en el norte y el oeste. Se caracteriza por su suelo llano con leves ondulaciones de arena rojiza, rodeadas de bañados, esteros y pantanos a los que concurren el terreno arcilloso y el perfil con escasa pendiente que retienen las aguas pluviales. El excelente clima, ha dado lugar a bosques frondosos, a los que se suman los palmares que siguen los cursos de los ríos.

La cuenca del río Santa Lucía está dentro de la ecorregión de bosques y esteros del Chaco húmedo. En la parte de la ecorregión en que se encuentra este río se suceden áreas topográficamente altas con otras bajas e inundables. Se trata de una secuencia de llanuras aluviales, en las que aparecen meandros antiguos y actuales, grandes cañadas, cauces abandonados, esteros, bañados, pantanos y lagunas, conformando una intrincada red de ríos y riachos que alternan con albardones e interfluvios.

Los suelos, originados en acumulaciones sedimentarias fluvio-lacustres, presentan desarrollo y textura variables; en general son neutros a ligeramente alcalinos y con drenaje insuficiente

La vegetación presenta una fisonomía dominante de parques y sabanas. Se trata de un macromosaico de bosques caducifolios y semicaducifolios, palmares, pastizales de tierra firme, pajonales y esteros.

En sus nacientes se desarrollan esteros y lagunas unidos por canales y, a partir de su sector medio, las aguas se encauzan y conforman el río Santa Lucía hasta su desembocadura en el río Paraná. Sobre suaves lomadas arenosas ubicadas hacia el noroeste, se observan cuerpos lagunares circulares, de 300 a 500 m de diámetro, y elípticas con orientación perpendicular al escurrimiento regional, cuyo eje mayor es de 4 a 10 veces mayor que las anteriores. Los afluentes del río Santa Lucía son el San Pedro, Artaza y Carballo.

La denominación de esteros del Iberá, se corresponde con una extensa área carente de relieve y exigua pendiente regional hacia el sudoeste, con predominio de ambientes palustres (esteros y bañados) que interconectan extensos cuerpos de agua poco profundos unidos por cursos de agua hasta desaguar y conformar el río **Corriente**. Se presenta una forma ligeramente cóncava

hacia el poniente pseudo-paralela a la estructura regional. Reconocida al sur del embalse Yacyretá, se proyecta en dirección sudoeste, considerándose a las cabeceras del río Corriente como límite del sistema. Si bien sus límites son graduales, el oriental es más nítido, en tanto que el occidental, posee un carácter más aleatorio en función de las condiciones hidrológicas reinantes. La cubeta de los esteros del Iberá es asimétrica en sentido transversal. El límite oriental constituye la divisoria de aguas de la provincia de Corrientes hacia los ríos Paraná y Uruguay (Neiff op. cit.). Hacia el sudeste, existe un mayor desarrollo de cuerpos lagunares destacándose las lagunas Luna, Iberá, Fernández, Medina y Trin. La laguna Iberá se conecta con el río Corriente a través de esteros, canales y lagunas.

La región hídrica de los esteros Batel - Batelito se ubica a modo de cuña entre los esteros del Iberá, al este, y la región de Santa Lucía, al oeste. El escurrimiento regional se concentra y conforma el arroyo **Batel**, afluente del río Corriente. Se puede diferenciar un área de esteros respecto a las lomadas arenosas cribadas por cuerpos lagunares de forma similar a la descrita en el sistema de Santa Lucía. Neiff (op.cit.) sugiere un origen eólico para estos cuencos y describe “son frecuentes las hoyas de deflación entre las dunas y en lo alto de las lomadas arenosas que poseen formas circulares y elípticas”.

La cuenca del río **Corriente** se encuentra dentro de la ecorregión de Bosques y esteros del Chaco húmedo y en la subregión de los esteros y Lagunas del Iberá. En su interior el área es deprimida a plana, con pendiente general NE-SO muy suave, pero en relación a los valles fluviales circundantes, presenta una mayor altura relativa. Se trata de un complejo sistema de esteros, bañados, cañadas, lagunas y riachos. Su alimentación es de origen pluvial, aunque se considera probable que también tenga alimentación por aguas subterráneas.

La cuenca del río Corriente actúa de colector final de los escurrimientos de las regiones Batel-Batelito y de los Esteros del Iberá. Desemboca sobre margen izquierda del río Paraná y presenta una asimetría manifiesta en el desarrollo de su red de drenaje. Hacia el este aflora la Formación Serra Geral, donde nacen varias subcuencas que con un sentido de escurrimiento hacia el oeste aportan al río Corriente por margen izquierda. Ellas presentan un patrón de diseño dendrítico marcado, realzado por un bosque en galería a lo largo de los cursos. Previo a su desembocadura, estos tributarios cruzan un “área de escarpa” de dirección norte - sur, a una cota aproximada de 50 m. Al oeste de la misma sobre un área llana fluye el río Corriente con hábito meandriforme. Esta unidad alcanza 20 km de ancho aguas abajo de la confluencia con el arroyo Villanueva, observándose en algunos sectores, un patrón geométrico rectangular característico del uso antrópico, particularmente sobre la margen izquierda. Por margen derecha recibe únicamente al arroyo Batel, emisario de los escurrimientos de la región Batel-Batelito. Hacia el poniente se observa un área de lomada, con el desarrollo de lagunas de forma elíptica perpendiculares al escurrimiento regional y cuerpos de agua que presentan formas generalmente redondeadas, de características análogas a las mencionadas en el desarrollo de la región hídrica del río Santa Lucía. A estas últimas se las identifica en ambas

márgenes del curso inferior del río Corriente. Los arroyos Pay Ubre Grande, Cuenca, Villanueva, María Grande y Batel desembocan en el río Corriente.

Otro de los ambientes propios de la región son los bañados formados por la acumulación temporaria de agua que cubre la superficie de las zonas más bajas en las épocas de lluvias abundantes. El agua se escurre hacia los arroyos temporarios o es absorbida por el suelo o queda en lagunas permanentes en los lugares más profundos. Cuando el escurrimiento ocupa bajos casi planos que dificultan el drenaje normal dan lugar a la formación del malezal.

Con respecto a los suelos predominan los entisoles hacia el occidente y los histosoles en los esteros Batel-Batelito y en el sector oriental del Iberá. Hay molisoles en la margen izquierda del río Corriente y alfisoles sobre el borde oriental de la región del río Santa Lucía. En las áreas altas domina el paisaje de sabana, y en niveles suavemente convexos, bosques de algarrobo y caranday. En los cordones arenosos se encuentran paisajes de sabana y de parque con palmares; en las numerosas lagunas que los acompañan se desarrolla vegetación palustre y acuática.

En los bajos del río Corriente se advierten cordones arenosos paralelos a la dirección de los principales cursos de agua, como los ríos Santa Lucía, Batel, Batelito y Corriente. Lomas y depresiones confieren al paisaje un relieve ondulado, con suelos planos donde se desarrollan extensos "malezales".

Los esteros se formaron debido a la escasa pendiente que presenta el territorio. Conforman grandes masas de agua, constituyendo zonas anegadizas de lagunas y bañados. Ocupan un área de más de 20.000 km², alimentados por las lluvias subtropicales de la región. Los esteros son depósitos de agua estancada con una profundidad que varía entre 1 y 3 metros, cubiertos por una cantidad de plantas acuáticas que surgen muchas veces desde su fondo y con pajonales en los bordes. Los esteros más importantes de esta cuenca son los del Iberá, Carambola, Batel y Batelito.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos cuenta con estaciones hidrológicas sobre el río Corrientes en Paso Lucero y Los Laureles; y sobre el río Batel se encuentra la estación de Paso Cerrito.

Las cuencas y subcuencas consideradas en esta zona para el cómputo del Balance Hídrico Superficial son:

- Ca. A° Empedrado y otros
- Ca. río Santa Lucía
- Ca. A° Batelito

- Ca. río Corriente
- Ca. A° Sarandicito y otros

Aportes a la margen izquierda del río Paraná entre Esquina y desembocadura en el Río de La Plata

Cuenca del río Guayquiraró

El río **Guayquiraró**, escurre en dirección noreste a sudoeste, y es compartido por las provincias de Corrientes y Entre Ríos, brindándole a la cuenca carácter de interprovincial. El principal afluente es el arroyo Barrancas, con un desarrollo mayor que el propio Guayquiraró. Ambos cursos fluyen con hábito meandriforme en sentido noreste-sudoeste con sus nacientes en el área de mayor expresión topográfica (Pay Ubre) y presentan mayor número de tributarios por margen izquierda. Hacia el oeste, tras surcar el área de escarpa, los cursos se desdibujan y fluyen por un área de escasa pendiente entre bañados y esteros.

Los elementos determinantes en la ondulación del paisaje, que corresponde a amplias lomadas de escasa pendiente y fondos planos, son las elevaciones conocidas con el nombre de cuchillas, viejas estructuras vinculadas a movimientos tectónicos del plegamiento andino, que raramente exceden los 100 metros sobre el nivel del mar. Las mismas comienzan a definirse en el sur de la provincia de Corrientes y al ingresar a Entre Ríos se bifurca en dos direcciones, con rumbo sudoeste la cuchilla Occidental o de Montiel, y hacia el sudeste la Cuchilla Oriental o Grande.

Las precipitaciones medias anuales en la zona son de aproximadamente 1200 mm. Dominan los bosques de especies xerófilas abiertas de un solo estrato entre las cuales, generalmente, aparece una vegetación herbácea densa. Las especies arbustivas y herbáceas son comunes para los pastizales pampeanos y poseen un alto valor como forraje. En zonas inundables aparecen pajonales, juncuales y carrizales.

Predomina el paisaje de sabana. En el sector de cabeceras de los arroyos se identifican praderas y bosques ribereños, y hacia las desembocaduras predominan pajonales, malezales y pastizales. En forma restringida se presentan bosques xerófilos y, en las áreas deprimidas, hay desarrollo de praderas húmedas. Los suelos predominantes son los molisoles, asociados a los valles fluviales, y los vertisoles, en los interfluvios.

El río Guayquiraró nace de la unión del arroyo homónimo con el arroyo Basualdo en las cercanías de la localidad de Sauce. Debido a la escasa pendiente, en ambas márgenes se forman bañados. Al este de la cuenca y al norte del arroyo Guayquiraró corre el arroyo Chañar

que recibe por margen izquierda las aguas de los arroyos Espinillos y Macieguitas, en las orillas de estos tres arroyos se forma extensos esteros.

Continúa con su dirección NE-SO y a unos pocos kilómetros recibe por margen derecha al arroyo Pelado y luego por margen izquierda al arroyo Tigre. Aquí el arroyo cambia de nombre a **Barrancas**. Sobre este arroyo se forma el estero más extenso de toda la cuenca alimentado conjuntamente con las aguas del arroyo Sarandi más al norte.

El arroyo **Sarandi** nace en el sector noreste de la cuenca alimentado por las aguas de los bañados de Gran Bay y Gara. Este arroyo recibe por margen izquierda las aguas del arroyo Ávalos que forma los bañados de Ávalos y Seco

Una extensa cadena de esteros y bañados se interconectan para desembocar en el río Guayquiraró a través del arroyo Barrancas. Este arroyo contiene aguas que provienen del estero Gran Bay y Gara al noreste y que a través de un sistema de pequeños arroyos se conecta a los esteros Seco y Ávalos para luego, hacia el suroeste unirse con los esteros de Poi y Sarandí Mini y por último pasar al bañado más extenso de la cuenca que se encuentra rodeado por el arroyo Sarandí al norte y arroyo Barrancas al sur.

Dentro de esta cuenca se encuentran la estación hidrométrica de Paso Juncué. Operada por la SSRH.

La Subsecretaria de Recursos Hídricos cuenta con estaciones hidrológicas sobre el río Guayquiraró en Paso Juncué y sobre el arroyo Barrancas en Paso La Llana.

Cuenca del A° del Yacaré y otros, pequeña área de aportes directa entre las Cuencas del Guayquiraró y del Feliciano

Cuenca del A° Feliciano

La cuenca del arroyo Feliciano se encuentra ubicada en el noroeste de la provincia de Entre Ríos, dentro de la unidad morfológica cuchillas entrerrianas. En esta zona existen numerosas lomadas, entre ellas, las de Montiel y Grande, con dirección Norte a Sur que constituyen la divisoria de aguas entre los ríos que desembocan en el Paraná al oeste y al sur, y en el Uruguay, al este.

El suelo está formado por el basamento del bloque precámbrico del macizo de Brasilia y sobre él se acumularon bancos calcáreos y sedimentos, en especial limos. El relieve es ondulado siendo la cota máxima de 80 m y la cota mínima es de 20 m, con suelos muy arcillosos, que se "lavan" con las abundantes precipitaciones.

Es una planicie con suaves lomadas y colinas originadas como interfluvios de numerosas vías de agua. Este sistema hídrico tiene sus orígenes en un clima subtropical húmedo y cálido, con precipitaciones medias anuales de 1100 milímetros; en verano la temperatura alcanza los 42 °C y los inviernos son suaves, con una temperatura de 14 °C.

Pertenece a la ecorregión de las sabanas mesopotámicas. Domina un bosque de especies xerófilas abiertas de un solo estrato, entre las cuales generalmente aparece una vegetación herbácea densa. Estos bosquecillos alternan con praderas y palmares. La especie arbórea que predomina es el ñandubay. Hay también algarrobo, espinillo, chañar, tala, molle, lapacho y timbó.

El arroyo Feliciano nace en la Lomada del Mocoretá, en el noreste de la provincia y fluye del oeste al sudoeste atravesando la provincia. Son sus afluentes más importantes los arroyos Estacas, Gonzalo, de las Achiras y Banderas. Está conformado por muchos meandros que perfilan un tipo de costa que deriva de barrancas abruptas y profundas a taludes suaves en pequeñas distancias.

La estación hidrológica de Paso Medina, perteneciente a la SSRH, se encuentra sobre el arroyo Feliciano.

Cuenca del A° del Tala y otros, pequeña área de aportes directos ubicada al norte de la ciudad de Paraná.

Cuenca del A° del Doll y otros, pequeña área de aportes directos ubicada al sur de la ciudad de Paraná, antes de la cuenca del Arroyo Nogoyá.

Cuenca del A° Nogoyá

La cuenca del arroyo **Nogoyá** se encuentra dentro de la región mesopotámica en ambiente de lomadas entrerrianas; de alturas bajas, chatas y anchas que fueron gestadas durante el cenozoico, cuando los ríos definieron sus cursos a medida que ascendía el bloque precámbrico del macizo de Brasilia, la erosión fluvial en sentido norte-sur sobre el suelo de composición arcillosa ha acabado por suavizar las ondulaciones que caracterizan el paisaje entrerriano con buenos suelos de aptitud agropecuaria. El relieve entrerriano presenta un paisaje de llanura sedimentaria originado en la erosión, levemente ondulada y de alturas no superiores a los 100 m, las conocidas “cuchillas entrerrianas”, que constituyen una prolongación del relieve de Corrientes y que al ingresar en la provincia de Entre Ríos se divide en dos brazos para determinar la divisoria de aguas hacia el Paraná y hacia el río Uruguay

La cuenca se encuentra dentro del clima templado de llanura con una temperatura media anual de 17 °C que varía de 25 °C en enero a 10 °C en julio. Las lluvias son abundantes (las precipitaciones medias anuales van de 1000 mm en el suroeste a 1600 mm en el noreste) y es una zona donde pueden llegar vientos del noreste como del sudeste. Cuando los vientos provienen del noreste llegan con aire cálido, subtropical y húmedo. En cambio, cuando el viento proviene del sudeste lo hace con aire polar marítimo, frío y húmedo.

Esta cuenca se encuentra dentro de la región Pastizales Húmedos, y dentro de ésta en la subregión, de los Pastizales Entrerrianos. La vegetación natural está compuesta por gramíneas formando praderas. Dentro del estrato arbóreo se encuentran el algarrobo y el ñandubay, y dentro de los arbustos el Baccharis. La singularidad que presenta esta subregión es la presencia de bosques de palmar en galería. Por los numerosos cursos de agua que la recorren y por los relictos de selvas en galería en el río y sus afluentes, por la presencia de sabanas y por el relieve ondulado, esta unidad adquiere identidad propia. Los factores de control natural son los incendios recurrentes y las inundaciones.

El arroyo Nogoyá nace en la falda oriental de la Cuchilla de Montiel y constituye el límite natural entre los departamentos de Victoria y Nogoyá y entre Victoria y Gualaguay; a partir de la unión de los arroyos La Gama y Oveja Negra recorre 135 km en territorio entrerriano primero en dirección sudeste y luego, con marcado rumbo sur, llega al delta del Paraná. Une sus aguas al arroyo Correntoso (brazo del Paraná) para formar el riacho Victoria en el paraje denominado Rincón del Nogoyá. Recibe numerosos afluentes, entre ellos el arroyo el Vizcachino, arroyo de la Aguada, arroyo Cuevas, arroyo Don Cristóbal, arroyo Montoya.

En las cercanías de la ciudad de Nogoyá comienza la planicie de inundación del arroyo con una cota entre 30 y 35 msnm y un ancho de 1200 m.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos cuenta con una estación hidrológica sobre el arroyo Nogoyá en el cruce con la ruta provincial N° 11.

Más al sur de la cuenca del arroyo Nogoyá se encuentra el delta del Paraná. El mecanismo de construcción del delta, se da a partir de los sedimentos que son acarreados por el río Paraná, la influencia del Uruguay y las mareas que afectan al estuario del río de La Plata. Así se forman numerosas islas que presentan gran cantidad de riachos, brazos y canales. Este fenómeno permite que se acreciente la superficie de extensión aguas abajo. Se pueden considerar cinco brazos principales en el Delta del Paraná: Paraná Pavón, Paraná-Ibicuy, Paraná de las Palmas, Paraná Guazú y Paraná Bravo.

Cuenca del río Gualeguay

El río **Gualeguay** nace al norte de la provincia de Entre Ríos en el departamento de Federación en la confluencia de las cuchillas Grande y de Montiel, en los bañados de altura a 75 msnm. La cuenca es la más extensa de la provincia de Entre Ríos, ocupando el 30% del territorio provincial, y está compuesta de gran variedad de suelos, todos ellos fértiles y propicios para la actividad agropecuaria, como la de los bañados, donde se encuentra su nacimiento que se componen de arcillas, limos densos y limos arcillosos.

La cuenca se encuentra dentro del clima templado de llanura con una temperatura media anual de 17 °C que varía de 25 °C en enero a 10 °C en julio. Las lluvias son abundantes (las precipitaciones medias anuales van de 1000mm en el suroeste a 1600mm en el noreste) y es una zona donde pueden llegar vientos del noreste como del sudeste. Cuando los vientos provienen del noreste llegan con aire cálido, subtropical y húmedo. En cambio, cuando el viento proviene del sudeste lo hace con aire polar marítimo, frío y húmedo.

La cuenca comprende las ecorregiones, según la clasificación de Daniele y Natenzon (1994), de la "Sabana Mesopotámica" (90% del área) y el 10% restante pertenece a la ecorregión de "Pastizales Húmedos" sobre la margen izquierda del río Uruguay. La ecorregión denominada Sabana Mesopotámica presenta formas de relieve bajas, esta planicie cuenta con ondulaciones suaves al norte de la provincia entrerriana. El drenaje es pobre e indefinido y hacia el sur la planicie se eleva formando suaves lomadas y colinas originadas de interfluvios de numerosas vías de agua.

La principal fuente de agua de los cursos de la cuenca proviene de las precipitaciones. El relieve de la zona favorece un buen escurrimiento debido a uno de los principales componentes edafológicos que son las arcillas; estas aguas de lluvia son recolectadas por uno de los tantos cursos que tiene la cuenca y circula en los cauces de características meandrosas, así la evacuación se hace más lenta y genera desbordes del curso inundando la zona de valle aluvial.

El curso principal puede dividirse en cuatro tramos bien definidos. El tramo del curso superior, cuyo origen se encuentra en las nacientes del río hasta un paraje llamado El Quebracho, localizado en el departamento de Villaguay. El agua fluye de noreste a sudoeste y entre los tributarios más caudalosos se encuentran los arroyos Federal, Ortiz, Del Medio y Sauce de Luna, todos ellos por la margen derecha; por el lado izquierdo recibe las aguas de los arroyos Moreira y Chañar.

En el curso medio, que va desde el paraje El Quebracho hasta la ciudad de Rosario de Tala, la orientación cambia de norte a sur y se pueden mencionar los arroyos Mojones, Tigre, Raíces,

Obispo y Tala por su margen derecha, y por la izquierda desembocan en el curso principal los arroyos Bergara, El Tigre y Villaguay Chico.

El curso inferior va de la ciudad de Rosario de Tala hasta la ciudad de Gualaguay y recibe gran número de afluentes de poco caudal manteniendo la orientación norte-sur.

Por último, en el tramo final que va desde Gualaguay hasta la desembocadura en el río Paraná, el curso se torna meandroso debido al relieve, compuesto por una planicie de muy reducida pendiente y un lecho de suelos de deposición que la propia dinámica del río ha generado y aquí se suma el arroyo Clé que puede ser tomado como una subcuenca

La Subsecretaría de Recursos Hídricos cuenta con una estación hidrométrica en la cuenca que se localiza en la estación Rosario del Tala.

2. METODOLOGÍA Y DATOS DISPONIBLES

2.1. LOS BALANCES HIDROLÓGICOS

La elaboración del balance hídrico constituye una fuente de datos fundamental para facilitar la gestión de los recursos hídricos por parte de los gobiernos. La finalidad principal de realizar un balance hídrico es conocer la disponibilidad de agua que tiene una cuenca o región, la que junto con la demanda por usos permitirá planificar en la asignación del recurso. Es por lo tanto una herramienta fundamental para los gestores a la hora de tomar decisiones si se conoce cuanto es la disponibilidad hídrica y cómo se presenta en tiempo y espacio, es decir en qué meses o periodos esa disponibilidad será mayor o menor, y dónde.

Paoli C. (2000) en su documento "Conceptos hidrológicos" explica en forma sencilla el establecimiento de los balances hídricos, texto que se cita a continuación:

"En el ciclo hidrológico, en la naturaleza o en una porción del mismo debe existir, conforme al principio de conservación de masa, un equilibrio entre las entradas, las salidas y las variaciones del sistema considerado. Las relaciones cuantitativas que se establecen para representar a este equilibrio, constituyen las formulaciones de los balances hidrológicos.

Para poder establecer un balance hidrológico es imprescindible definir el sistema o porción del mismo al que se aplica y el intervalo de tiempo que se considera. Por lo tanto no existe una única expresión del balance sino tantas como asociaciones de sistemas e intervalos de tiempo puedan plantearse.

En el planteo del ciclo hidrológico se puede acotar perfectamente un sistema físico representado por una cuenca, sobre el cual realizar un balance. Como es bien conocido, los fenómenos naturales y entre ellos los hidrológicos presentan temporalmente un componente cíclico anual que será el intervalo de tiempo que se plantea seguidamente.

En el término de un año, en una cuenca hidrológicamente aislada la cantidad total de precipitaciones que ha entrado al sistema físico considerado se ha transformado dando lugar a variables de salida y a variaciones en las variables de almacenamiento. La Ecuación (1) expresa este balance:

$$P = E + A \pm \Delta S \pm \Delta H \pm \Delta G \quad (1)$$

Siendo:

P: Precipitación (mm)

E: Evaporación y evapotranspiración (mm)

A: Escurrimiento (mm)

S: Almacenamientos superficial (mm)

H: Almacenamiento de agua en el suelo (mm)

G: Almacenamiento de agua subterránea (mm)

Se observa que la variable de almacenamiento por intercepción no interviene por cuanto, la misma es de carácter transitorio y la cantidad de agua que durante las tormentas se hubiere almacenado se ha transformado en evaporación o en aporte al suelo, al cabo de un año.

Tampoco intervienen las variables de transporte internas del sistema físico, puesto que las mismas sólo representan movimientos y distribuciones que al cabo de un año quedan computadas en las variables de salida o de almacenamiento.

El fenómeno de precipitación es de características episódicas, pero la variable precipitación anual, se considera un evento individual compuesto por la suma de los episodios lluviosos ocurridos durante el año. Es una variable que asume valores entre montos mínimos y máximos que dependen de las características climáticas del lugar que se estudia.

Las pérdidas o salidas por evaporación y evapotranspiración representan fenómenos temporales continuos y su monto anual se obtiene por integración en ese período del tiempo. También asume valores entre montos mínimos y máximos, pero estos dependen no solamente de las características climáticas del lugar sino también de la disponibilidad de agua del sistema físico para alimentar a los procesos. El valor máximo que puede asumir se encuentra por lo tanto acotado por una parte por la capacidad evaporante de la atmósfera, es decir el máximo que puede admitir y por otra parte por la capacidad que tiene el sistema físico para ofrecer agua para ser evaporada o evapotranspirada. Por estas razones los valores anuales presentan una variabilidad menor que los de precipitación.

Las variables de almacenamiento superficial, en el suelo y freática se caracterizan por estar acotadas entre un valor mínimo y un máximo que dependen de las características fisiográficas del lugar, geomórficas, vegetación, suelo, y subsuelo. La suma de las capacidades de almacenamiento de cada nivel, conforman la capacidad de almacenamiento total del sistema que constituye una característica muy importante del mismo. En la ecuación de balance estos términos se computan como variación de almacenamiento con respecto al año anterior (Δ), dado que los valores absolutos que asumen son acumulativos. La indicación de signos positivos o negativos en las variaciones de almacenamiento muestra que para el año considerado los niveles de almacenamiento pueden haber aumentado o disminuido respecto del año anterior, lo que ocurre generalmente según se trate de años húmedos o secos respectivamente.

El escurrimiento es un fenómeno temporalmente continuo aunque puede asumir el valor cero durante prolongados períodos y su monto anual se obtiene por integración en ese período de tiempo. Debido a que es el resultante de todos los procesos anteriores, es sin duda, el de mayor variabilidad. Se encuentra acotado entre un valor mínimo, y un máximo que dependen del monto de precipitación y de la capacidad de almacenamiento del sistema físico.

Si el balance se plantea para una cuenca hidrológicamente no aislada deben considerarse otros aportes y pérdidas según el esquema de ciclo representado. Si parte de las precipitaciones son nivales, debe considerarse que proporción de las mismas aporta efectivamente en el período considerado y qué proporción lo hace en el período siguiente.

La expresión del balance quedaría en estos casos como muestra la Ecuación 2:

$$GA + NA + P = E + A + Gp + Np \pm \Delta S \pm \Delta H \pm \Delta G \quad (2)$$

Donde:

GA: Aporte de aguas subterráneas de otras cuencas

NA: Aporte por nieve proveniente del período anterior

Gp: Pérdidas de aguas subterráneas hacia otras cuencas o en profundidad

Np: Transferencia de nieve hacia el período siguiente

Si se dispone de registros de todas las variables intervinientes durante una serie de años y se plantea el promedio de los valores anuales, se obtiene por resultado el balance medio para una cuenca o sistema hídrico determinado.

Si esto se hace para una cuenca hidrológicamente aislada y además se cumple con el requisito de que el sistema sea estacionario, es decir invariante temporalmente, lo que proporciona series de datos homogéneos, se encuentra la relación expresada en la Ecuación 3:

$$\bar{P} = \bar{E} + \bar{A} \quad (3)$$

Donde:

\bar{P} : Precipitación media anual para el período.

\bar{E} : Pérdidas por evaporación y evapotranspiración media anual para el período.

\bar{A} : Escurrimiento medio anual para el período.

Como se aprecia en la Ecuación 1 las principales componentes del balance son precipitación, evapotranspiración real y escurrimiento. Como resulta evidente, las variaciones de

almacenamiento que son de signos positivos y negativos en una serie de años se anulan al promediarse. Si esto no se verificara significará por ejemplo que los almacenamientos superficiales promedio, o la humedad promedio del suelo o el nivel freático medio, tienden a aumentar o disminuir con el tiempo y por lo tanto deja ya de ser un sistema estacionario.

Queda aún por definir si el intervalo de tiempo de un año comienza en algún momento determinado distinto al año civil. Es común definir al año hidrológico diferente del año civil para el cálculo de balances, y es también común considerar que el mismo se toma a partir del momento en que el régimen de precipitaciones y escurrimiento deja los valores mínimos y comienza a incrementarse. Se trata de esta forma de englobar en el intervalo de un año a todo el período lluvioso, hecho que no siempre se produce al considerar el año civil. Para otro tipo de análisis hidrológico, como por ejemplo para el estudio de sequías y estiajes puede resultar de interés elegir un año hidrológico con un criterio totalmente contrapuesto con el anterior. Resumiendo, la elección del año hidrológico depende del régimen de la región o cuenca y del objetivo del estudio perseguido”.

Como ejemplo, para una cuenca del río Paraná en Argentina, siendo el objetivo de estudio el análisis de caudales de crecidas, el año hidrológico debe considerarse desde setiembre a agosto.

2.1.1. TAREAS A LLEVAR A CABO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BALANCE

La metodología para utilización de modelos de balance hidrológico a paso de tiempo mensual para una cuenca como unidad de análisis, se resume en los siguientes pasos:

- Selección y análisis de estaciones de aforos de caudales.
- Análisis de consistencia y homogeneidad de series mensuales de caudales disponibles.
- Determinación de precipitaciones mensuales areales y ETP areales para las cuencas correspondientes a los sitios de medición
- Calibración del modelo
- Verificación del modelo, para un período de medición diferente al de calibración
- Posibilidad de aplicación del modelo en cuencas no aforadas de características hidrometeorológicas similares a las existentes en las cuencas calibradas

Las variables hidrológicas pueden ser estacionaras o no, y homogéneas o no. En las series estacionarias el valor medio de una muestra no se altera a lo largo del tiempo, el caso contrario indica posibles tendencias manifestadas por aumentos o disminuciones graduales, que se podrían dar en forma alternada o también con saltos en su valor medio. Las causas podrían ser

naturales o antrópicas. Decimos que las series hidrológicas son homogéneas cuando la variabilidad en torno a su valor medio es la misma a lo largo del tiempo, es decir las fluctuaciones no se amplifican o disminuyen. Todos los análisis estadísticos clásicos requieren que las series sean estacionarias y homogéneas como primera premisa.

Para cualquier estudio hidrológico que se realice, la información de base que se use debe ser en todos los casos consistente y libre de errores que lleven a resultados equivocados. También para el caso en que los datos se deban utilizar para el contraste de los resultados, deben ser confiables.

Por lo tanto lo primero será llevar a cabo un tratamiento de la información, para asegurar las premisas de consistencia y homogeneidad, como se detalla a continuación, tanto para las series mensuales hidroclimáticas de entrada a los modelos como para las de caudales observados para la calibración de los mismos:

- Diagramas de disponibilidad datos, para visualizar los datos faltantes y visualizar los periodos comunes de información entre estaciones
- Gráficos con la distribución temporal de las series anuales, para identificar los periodos por encima o debajo de la media de la series y detectar tendencias
- Gráficos con la distribución en el año de las series mensuales, para detectar estacionalidades
- Análisis de Dobles Masas, para detectar posibles errores ya sean puntuales o sistemáticos
- Rellenamiento de las series de datos en los casos que sea conveniente
- Cálculos de los principales estadísticos muestrales de las series, estadística descriptiva
- Test de homogeneidad paramétricos y no paramétricos

Realizar esas tareas posibilita caracterizar las series y descartar las estaciones que no sean consistentes y no presenten un comportamiento estacionario.

2.1.2. ESTADO DEL ARTE ACERCA DE LOS BALANCES HÍDRICOS

Muchas son las aplicaciones que se les dan a los balances hídricos, siendo la principal la de conocer la disponibilidad de agua, ya sean por excesos o déficit, para una parcela, una cuenca hidrográfica, aportando a la planificación y gestión de los recursos hídricos. Se pueden citar entonces estudios con modelos de balance hídricos, desde la rama de la hidrología de superficie, la hidrogeología, la agronomía, ya sean puntuales o distribuidos.

Una de las aplicaciones más comunes es el uso de los modelos de balances hídricos como base para estimar la recarga potencial. La recarga del acuífero libre es uno de los procesos más importantes en la hidrología de las aguas subterráneas, pues constituye reserva renovable de este manantial. Por lo tanto, una buena estimación de esta variable es fundamental para una gestión adecuada de los recursos hídricos, sobre todo frente a la variabilidad climática inherente al régimen climático, así como el avance de la contaminación de las aguas superficiales y el aumento de la demanda de aguas subterráneas de buena calidad. (Machado Pontes et al., 2016).

Muchos son también los estudios en relación al cambio climático y las disponibilidades de agua, un ejemplo de ellos es el trabajo de Pedraza et al. (2010) que analiza en la región Litoral y Mesopotámica de Argentina dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, A2 y B2, definidos por el IPCC, cuyos resultados indican una drástica disminución de los excesos y un aumento generalizado del déficit hídrico en la región, causado fundamentalmente por un incremento de la evapotranspiración, debido al aumento de la temperatura del aire.

También debido a los avances de la contaminación y la antropización de las cuencas el uso de los modelos de balance pueden servir de predictores para conocer la disponibilidad de agua. Según presenta Xue et al. (2008) en la investigación del flujo superficial y del transporte de masa asociado para la cuenca de Xitiaoxi, una de las mayores cuencas en la región de Taihu, donde la contaminación de las cuencas circundantes contribuye en gran medida a la eutrofización de los cuerpos de agua en la región. El análisis del balance hídrico revela los porcentajes de precipitación que componen el flujo superficial, la evapotranspiración, la recarga del agua subterránea y el cambio de almacenamiento del suelo, todos los cuales se consideran útiles para la comprensión de los procesos hidrológicos en la cuenca de Xitiaoxi. Este estudio proporciona una buena base para estudios adicionales en modelado de transporte masivo y comparación de modelos de resultados de modelos hidrológicos similares.

Por su parte Shou-ke WEI (2012) desarrolló un enfoque híbrido integrando el modelo conceptual de balance hídrico y la regresión econométrica para estimar la escasez de agua y sus incertidumbres en de Beijing, una zona extremadamente escasa de agua en China. Este enfoque de modelización puede ayudar a la administración del agua para crear estrategias sostenibles de asignación de agua en áreas de escasez.

Un interesante análisis fue llevado a cabo por Nasonova (2012) para toda la superficie del globo terrestre, excepto la Antártida, acerca de la incertidumbre de utilizar datos pluviométricos provenientes de estaciones convencionales frente al uso de datos globales de precipitación para el cálculo de las componentes del balance hídrico y de los métodos de cálculo, revelando que las diferencias en los valores utilizados de precipitación tienen un efecto considerable en el reparto, de precipitación simulada, entre evapotranspiración y escorrentía, resultando en

incertidumbres en las estimaciones globales de los componentes del balance hídrico terrestre, manifestándose en una amplia dispersión de sus valores. Las estimaciones globales de la evapotranspiración anual mostraron una mayor dependencia de la elección del método de cálculo que de la elección del conjunto de datos de precipitación, mientras que la situación con el escurrimiento simulado es inversa. La fuente de datos es un tema al que muchas veces no se le presta la debida atención, del mismo modo que la elección del modelo de cálculo no debe ser arbitrario sino responder a las características físicas locales.

En Rusia, se analiza la redistribución espacio-temporales del agua en el Mar Caspio Norte, considerando los siguientes elementos espaciales: tres partes del Mar Caspio del Norte: la zona poco profunda del estuario del río Volga, la zona profunda en la parte occidental del Mar Caspio Norte y la parte oriental del Mar Caspio Norte . El balance se realizó teniendo en cuenta el volumen de escurrimiento del río, la pérdida de evaporación y la cantidad de precipitación a diferentes niveles de fondo del Mar Caspio (Ostroumova et al., 2015).

Un interesante artículo que relaciona la cosecha de agua urbana y el uso del agua residencial aplica un modelo de balance hídrico para investigar las posibles limitaciones espaciales y temporales para recolectar los recursos hídricos locales dependiendo de las construcciones, para los Países Bajos, con un enfoque en la demanda de agua para hogares (Agudelo-Vera et al., 2013).

También el tema de asignación de agua es atendido por medio de la optimización de modelos de balance hídrico. Araújo de Almeida y Curi (2016) realizan una investigación donde se evalúa el uso conjunto de un modelo de optimización de otorgamiento de agua con otro propuesto para el cobro, para ayudar a los tomadores de decisión en la asignación de agua del reservorio Acauã, ubicado en la cuenca hidrográfica del Río Paraíba, PB, Brasil. El modelo de otorgamiento permitió optimizar la garantía de la atención a las demandas adecuándolas a las disponibilidades del agua, según prioridades de su uso definidas en cuatro escenarios. Por su parte el modelo de cobro propuesto incorporó diversos perfiles de usuarios de agua, de forma que el modelo pueda incentivar el uso racional del agua, y no tenga sólo una finalidad recaudatoria.

Existen diversas herramientas útiles para la realización de balances hídricos, en las que se estiman las variables que incluyen el balance a diferentes escalas, espaciales y temporales, modelos acoplados con Sistemas de Información Geográfica, o modelos que pueden usar tanto series de tiempo como datos globales. La lista es extensa y dependerá de los objetivos de cada balance, pero se pueden mencionar a modo de ejemplo:

- HidroSIG 4.0 es una extensión del Sistema de Información Geográfico MapWindow, que permite realizar estimaciones y análisis de variables hidrológicas, climáticas y geomorfológicas para la planificación y cuantificación del recurso hídrico.
- TopoToolbox es una compilado de funciones para Matlab para el análisis de relieve y zonas de flujo para modelos digitales de terreno. Ofrece varias funciones de análisis geoespacial en un entorno fuera de un sistema GIS.

Es oportuno también mencionar que la importancia de conocer los balances hídricos a nivel mundial ha suscitado el interés de instituciones como UNESCO a través de su Programa Hidrológico Internacional (PHI), o el Programa EuroCLIMA, a través de su componente EuroCLIMA-Agua, que llevan adelante actividades para facilitar a los países la evaluación de sus recursos hídricos. Estas instituciones han publicado destacados textos que posibilitan su realización, como la “Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas” (UNESCO, 2006) como también proporcionado plataformas de formación de capacidades e intercambio de información como “AquaKnow”.

2.1.3. *MODELO CHAC-TÉMEZ*

De la variada gama de modelos de balance disponible se ha seleccionado el programa CHAC (Cálculo hidrometeorológico de aportaciones y crecidas), desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX, 2012). El mismo es de uso libre y gratuito.

El modelo matemático de balance de cuenca CHAC aplica el método de Témez, que es un modelo conceptual agregado, de simulación continua, de pocos parámetros, paso mensual, que aplica el principio de continuidad y simula los principales procesos de transferencia de agua en el ciclo hidrológico considerando dos almacenamientos: suelo (zona no saturada) y acuífero (zona saturada).

El programa CHAC permite analizar y procesar series de tiempo con graficación, y análisis de disponibilidad de información. Realizar análisis de consistencia mediante dobles masas, completamiento de series utilizando métodos de correlación y la determinación de estadísticos básicos y análisis de frecuencia. También se puede realizar la estimación de la evapotranspiración potencial por los métodos de Thornthwaite, Blaney-Criddle y Penman-Montheith. Finalmente se pueden obtener caudales mediante el balance de Témez. La Figura 4 resume las variables utilizadas por el método de Témez

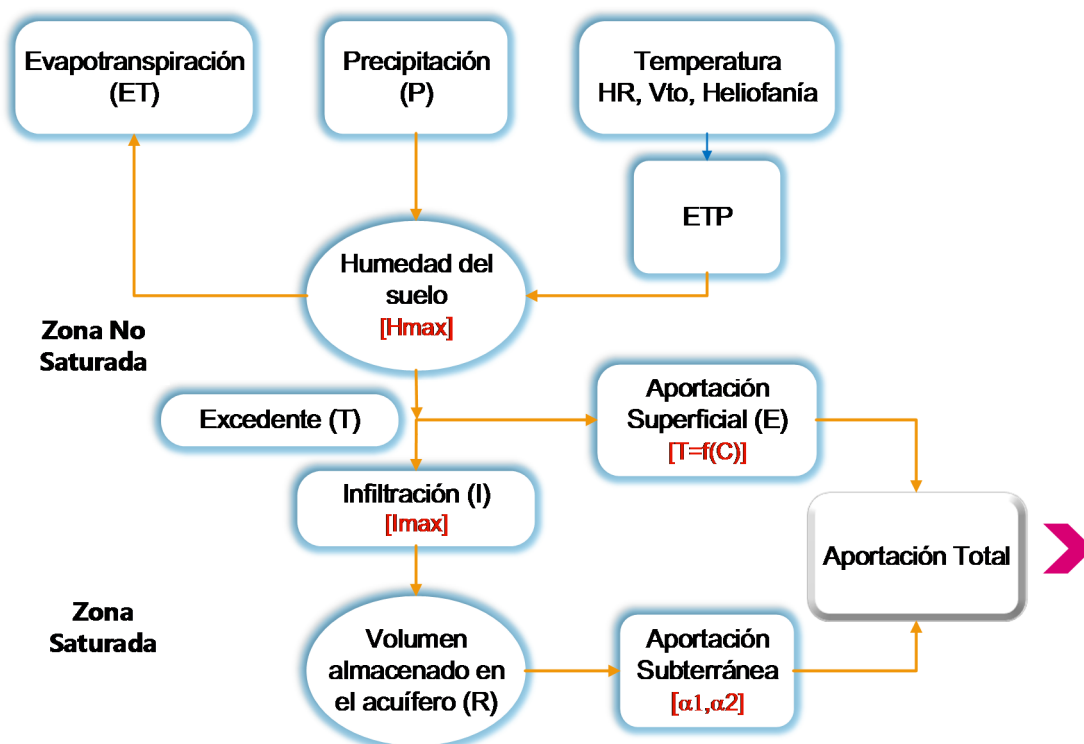


Figura 4. Esquema conceptual del método de Témez.

El agua precipitada (P), una vez en el suelo, se divide en evapotranspiración (ET) y excedente (T). El excedente a su vez alimenta la escorrentía superficial (E), y la fracción remanente pasa a formar parte de las reservas dentro del acuífero subterráneo, mediante la infiltración (I). Esta infiltración se convierte en recarga (R) al acuífero, mientras la otra parte del excedente va íntegramente a formar parte de la escorrentía superficial o directa durante el periodo de análisis. Finalmente la aportación total para el mes se calcula como la suma de la escorrentía superficial y la aportación subterránea, según explica Soto Benavides (2001).

La Figura 5 extraída del manual CHAC (CEDEX, 2012), sintetiza las ecuaciones del método de Témez.

A continuación se describen las características del modelo de CHAC-Témez según Molina Carpio y Espinoza Romero (2006):

“La información de entrada para la calibración con el programa CHAC se corresponde con las series de datos mensuales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y caudales observados, datos generales, valores iniciales y parámetros del modelo.

Cada subcuenca tiene una sola serie de cada variable, lo que corresponde a un modelo agregado. Esto significa que los valores de precipitación y ETP han resultado de un cálculo espacial de ambas variables.

Umbral de escorrentía, P_o	$P_o = C \cdot (H_{m\acute{a}x} - H_{i-1})$
Excedente, T_i	$P_i \leq P_o \Rightarrow T_i = 0$ $P_i > P_o \Rightarrow T_i = \frac{(P_i - P_o)^2}{P_i + \delta - 2P_o} \text{ siendo}$ $\delta = H_{m\acute{a}x} - H_{i-1} + EP_i$
Balance de agua en el suelo, H_i	$H_i = \text{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)$
Evapotranspiración real, ER_i	$ER_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i)$
Infiltración, I_i	$I_i = I_{m\acute{a}x} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{m\acute{a}x}}$
Aportación superficial, A_{SUP_i}	$A_{SUP_i} = T_i - I_i$
Caudal drenado por el acuífero, Q_i	$Q_i = \alpha \cdot V_i$ $Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha \cdot t} + \alpha \cdot R_i \cdot e^{-\alpha \frac{t}{2}}$
Aportación subterránea, A_{SUB_i}	$A_{SUB_i} = V_{i-1} - V_i + R_i \cdot t$
Aportación total, A_{TOT_i}	$A_{TOT_i} = A_{SUP_i} + A_{SUB_i}$
VARIANTES DEL MODELO	
Siendo	Parámetro número de días con precipitación Dos ramas de descarga del acuífero: $\alpha 1$: Coeficiente de descarga del acuífero. días ⁻¹ $\alpha 2$: Coeficiente de descarga del acuífero. días ⁻¹ Parámetro de reparto de recarga: tanto por uno

Figura 5. Ecuaciones del método de Témez (CEDEX, 2012).

Los datos generales son: el área de la cuenca, el número de días de lluvia mes y el coeficiente ETP o de uso de suelo, su valor es 1 si los valores ingresados fueron calculados mediante el método que mejor se ajuste a la región y uso de suelo.

Los datos iniciales son el caudal subterráneo y la humedad del suelo correspondiente al primer mes del periodo de simulación. Si no existen valores medidos se asumen valores sujetos a posterior corrección. El uso del año hidrológico en la modelación permite asumir una humedad baja al inicio de la simulación

Los cuatro parámetros de calibración se explican a continuación:

- *Parámetro “C” de excedencia*: se usa para calcular el valor límite “Po” de la precipitación por encima de la cual habrá excedente de agua para la escorrentía e infiltración. Si C es 0 el valor de Po=0, por lo que toda la lluvia, aun de pequeña

magnitud producirá esorrentía a la salida de la cuenca. Como se puede observar en la Figura 5, P_o depende tanto de C como del contenido de agua en el suelo del mes anterior. Este parámetro es adimensional y su rango entre 0 y 1.

- “*HMAX*”: capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo y zona no saturada en mm por mes, incluyendo el almacenamiento superficial y en la vegetación. El agua almacenada en el suelo estará disponible para la evapotranspiración por lo que un valor más grande de *HMAX* implica, en principio, una disminución del volumen de esorrentía. Este valor se puede obtener en base a información cartográfica, combinando un mapa de suelos o fisiografía con un mapa de vegetación.
- “*IMAX*”: infiltración máxima posible en el mes, en mm. Este parámetro determina la división del excedente T en esorrentía superficial y recarga al acuífero, por lo que su nombre más adecuado sería de percolación máxima. Varios autores proponen estimar I_{max} a partir de la características hidrogeológicas de la cuenca
- *Coefficiente de descarga del acuífero “ α ”*: es la inversa de la constante de recesión “ k ” ($\alpha = 1/k$) expresada en (1/días). Resulta de considerar al acuífero un embalse lineal lo que lleva a ecuaciones del tipo: $Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\Delta t/k} = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha \Delta t}$; para el caudal Q drenado por el acuífero en el intervalo $(i-1;i)$. Se puede obtener de los registros hidrométricos de la época de estiaje o por calibración. El parámetro α es más grande en cuencas pequeñas o con acuíferos poco importantes”

La preparación de la información para la implementación del programa CHAC se explica en los puntos siguientes.

2.1.3.1. LOS ARCHIVOS DE ENTRADA AL MODELO

El programa CHAC utiliza un formato específico de archivos de entrada de datos denominado “Formato LEMA”. El mismo requiere considerar la siguiente información:

- ubicación de la estación en coordenadas UTM,
- código que la identifica,
- tipo de variable,
- montos mensuales comenzando en el mes de inicio del año hidrológico y
- monto anual de la variable.

El formato y la identificación de cada variable está estipulada en el manual de usuario del modelo (CEDEX, 2012). A modo de ejemplo se muestra en la Figura 6 un archivo de precipitación mensual.

Station ID	Station Name	Variable	Unit	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
738629	6481184	ParaA	PMT	61.9	147.7	31.5	104.1	305.6	75.0	240.1	75.3	101.8	17.4	12.6	30.6	1203.6					
738629	6481184	ParaA	PMT	101.2	44.2	102.2	137.1	55.5	52.8	165.0	42.6	23.6	33.3	33.2	54.3	845.0					
738629	6481184	ParaA	PMT	247.0	84.8	128.6	40.0	138.6	383.4	257.1	240.8	6.3	93.1	29.7	.0	1659.4					
738629	6481184	ParaA	PMT	3.6	121.5	53.6	42.9	151.8	128.2	78.4	22.0	65.9	36.8	13.0	32.5	781.4					
738629	6481184	ParaA	PMT	37.6	28.8	69.6	162.2	55.9	72.4	244.3	65.1	81.3	77.3	22.8	61.7	979.0					
738629	6481184	ParaA	PMT	126.9	47.7	46.9	20.3	175.4	88.9	108.9	83.8	113.1	.9	9.3	107.5	929.6					
738629	6481184	ParaA	PMT	3.0	210.0	99.4	197.0	82.4	157.2	154.3	40.1	26.9	31.2	31.0	27.2	1055.7					
738629	6481184	ParaA	PMT	63.8	140.1	185.5	153.9	347.0	131.1	371.3	33.4	11.0	63.4	69.9	1.8	1572.2					
738629	6481184	ParaA	PMT	88.2	118.3	164.1	134.5	64.2	122.1	108.2	184.7	5.6	60.0	4.7	44.1	1098.7					
738629	6481184	ParaA	PMT	162.2	84.8	312.7	145.3	10.1	78.9	172.5	262.8	45.0	36.9	36.1	33.6	1380.9					
738629	6481184	ParaA	PMT	24.0	64.6	229.4	51.7	253.7	260.4	42.8	231.8	220.5	4.7	46.0	32.6	1464.2					
738629	6481184	ParaA	PMT	16.2	105.9	80.1	159.3	81.0	104.5	73.1	81.4	38.1	90.7	15.1	5.8	851.2					
738629	6481184	ParaA	PMT	199.7	52.6	128.0	37.3	72.7	292.7	100.1	77.4	177.8	46.1	29.7	46.2	1260.3					
738629	6481184	ParaA	PMT	46.6	148.6	128.8	53.5	227.8	339.9	175.6	33.5	21.3	16.3	28.1	25.6	1255.6					
738629	6481184	ParaA	PMT	146.6	236.7	64.8	73.8	39.7	100.3	114.8	168.1	21.4	52.8	83.0	29.6	1331.6					
738629	6481184	ParaA	PMT	90.4	130.7	39.8	89.0	138.1	39.6	140.2	312.8	47.1	65.4	22.0	32.6	1147.7					
738629	6481184	ParaA	PMT	70.6	115.6	222.0	117.8	94.9	85.3	188.7	51.8	73.9	.0	35.6	24.0	1080.2					
738629	6481184	ParaA	PMT	35.0	101.6	86.0	126.8	241.7	80.6	151.2	29.5	.0	10.1	63.2	23.4	949.1					
738629	6481184	ParaA	PMT	60.7	136.3	44.1	108.2	10.3	60.2	126.6	88.6	35.9	32.7	3.0	76.9	783.5					
738629	6481184	ParaA	PMT	6.8	109.9	176.9	121.1	180.3	219.9	200.9	109.0	9.4	10.7	44.7	17.0	1206.6					
738629	6481184	ParaA	PMT	17.6	112.9	152.2	215.4	186.2	3.6	26.2	118.4	86.1	105.2	63.5	46.7	1134.0					
738629	6481184	ParaA	PMT	42.4	99.8	50.6	276.0	61.9	63.2	29.4	126.6	62.8	52.7	7.7	24.8	1095.8					
738629	6481184	ParaA	PMT	51.3	159.4	106.0	350.0	61.9	63.2	29.4	126.6	62.8	52.7	7.7	24.8	1095.8					
738629	6481184	ParaA	PMT	8.4	443.3	236.9	72.3	61.5	47.6	102.8	88.8	55.0	36.3	7.4	23.2	1183.5					
738629	6481184	ParaA	PMT	8.4	135.2	126.1	141.9	119.7	59.7	153.7	147.1	28.0	8.4	2.6	.3	931.1					
738629	6481184	ParaA	PMT	29.0	173.7	189.7	36.4	92.5	207.3	112.4	115.0	35.3	11.5	.0	6.9	1009.7					
738629	6481184	ParaA	PMT	39.6	54.8	127.4	46.8	75.6	108.9	27.8	36.3	45.0	51.8	35.3	58.8	708.1					
738629	6481184	ParaA	PMT	24.1	135.8	122.6	244.4	238.4	60.6	296.6	87.5	32.4	29.8	63.1	20.3	1355.6					
738629	6481184	ParaA	PMT	76.5	45.1	124.1	122.9	78.0	121.0	170.8	304.8	17.7	69.3	86.9	13.2	1230.3					
738629	6481184	ParaA	PMT	33.5	35.7	14.3	145.0	80.8	222.7	108.6	351.6	182.8	12.6	42.0	63.3	1392.9					
738629	6481184	ParaA	PMT	92.5	170.1	136.0	115.5	100.5	152.0	130.2	87.4	13.3	113.0	1.0	108.4	1219.9					
738629	6481184	ParaA	PMT	73.6	199.0	151.7	88.3	105.4	27.7	176.6	167.4	65.7	1.0	40.3	39.0	1135.7					
738629	6481184	ParaA	PMT	176.0	195.0	245.1	252.7	29.7	253.7	116.0	278.0	103.8	7.7	44.0	85.3	1787.0					
738629	6481184	ParaA	PMT	79.0	84.6	58.0	176.3	9.7	41.5	108.0	331.2	24.0	26.6	9.5	.6	949.0					
738629	6481184	ParaA	PMT	21.3	87.5	173.0	196.8	190.6	65.0	286.3	140.6	17.5	85.4	25.4	55.0	1344.4					
738629	6481184	ParaA	PMT	22.4	83.5	157.1	32.8	76.2	133.1	141.7	43.7	.3	108.4	29.8	18.1	847.1					
738629	6481184	ParaA	PMT	8.8	118.1	116.1	404.9	143.3	91.3	539.1	48.4	31.5	.5	20.8	1587.2						
738629	6481184	ParaA	PMT	118.6	115.8	6.7	109.2	167.6	120.8	36.7	44.6	16.2	7.0	10.5	.2	753.9					
738629	6481184	ParaA	PMT	50.2	118.5	97.3	17.7	35.0	197.0	292.0	85.5	64.9	7.0	70.0	8.6	1043.7					
738629	6481184	ParaA	PMT	123.4	67.8	163.3	236.1	164.0	356.0	265.0	72.0	102.9	5.1	13.6	17.0	1586.2					
348658	6347548	GualteA	PMT	75.0	183.8	7.7	109.9	322.8	202.0	66.4	55.6	171.8	18.8	46.5	17.2	1277.5					
348658	6347548	GualteA	PMT	69.6	14.8	53.4	312.2	186.9	10.1	195.0	67.4	44.4	121.5	89.0	97.9	1245.2					
348658	6347548	GualteA	PMT	209.9	157.7	101.9	41.1	163.1	363.3	38.8	147.7	9.0	115.4	86.9	3.8	1438.6					
348658	6347548	GualteA	PMT	15.6	145.9	34.1	38.1	257.1	71.1	69.8	18.8	74.1	22.2	16.9	26.3	790.0					
348658	6347548	GualteA	PMT	126.3	19.5	52.2	95.7	38.3	60.9	144.8	112.6	104.7	75.8	21.8	72.5	925.1					
348658	6347548	GualteA	PMT	112.1	26.8	80.4	31.7	181.6	111.5	157.4	82.0	65.4	20.7	50.6	148.9	1070.1					
348658	6347548	GualteA	PMT	12.5	227.3	102.9	184.4	133.5	314.0	121.3	54.5	51.1	45.4	97.2	41.8	1385.9					
348658	6347548	GualteA	PMT	127.6	111.7	102.5	75.9	278.6	82.7	317.9	22.3	22.3	118.6	134.7	19.3	1414.1					
348658	6347548	GualteA	PMT	208.3	108.8	171.9	94.8	2.1	24.5	80.1	32.4	6.9	21.7	37.8	44.4	833.7					
348658	6347548	GualteA	PMT	19.6	120.2	164.2	73.4	38.3	95.4	98.5	242.7	113.6	92.7	41.3	36.1	1136.0					
348658	6347548	GualteA	PMT	56.3	80.5	169.8	44.1	274.1	59.4	5.8	104.8	311.5	14.0	65.3	47.3	1332.9					
348658	6347548	GualteA	PMT	42.9	26.0	56.3	47.1	81.5	185.7	79.9	78.7	153.1	73.7	28.2	25.0	878.1					
348658	6347548	GualteA	PMT	134.9	58.4	64.9	10.5	77.3	147.9	58.4	59.9	44.2	28.3	9.1	111.1	804.9					
348658	6347548	GualteA	PMT	96.1	98.1	68.7	57.4	172.2	651.7	140.6	72.8	74.8	43.7	115.0	9.9	1601.0					
348658	6347548	GualteA	PMT	104.8	149.3	36.4	26.9	60.9	66.8	71.3	45.6	90.8	60.7	78.9	924.4						
348658	6347548	GualteA	PMT	60.7	103.3	90.7	116.6	75.8	11.9	86.3	213.4	84.5	53.0	23.0	126.6	1045.8					
348658	6347548	GualteA	PMT	84.8	134.5	333.5	14.1	50.3	128.5	119.1	88.2	11.9	.0	45.0	79.6	1089.5					
348658	6347548	GualteA	PMT	63.9	106.5	74.8	183.8	158.3	153.0	213.2	50.1	.3	16.7	49.4	21.9	1071.9					

La primera tarea es completar los datos mensuales faltantes. Esto se realiza en el programa a partir de un modelo de regresión bivariado con estacionarización mensual de las series de datos. La elección de la pareja de estaciones que va a ser utilizada para el completado de cada una de las lagunas de una estación dada se basa en considerar un umbral mínimo del coeficiente de correlación múltiple ponderado según la expresión de la matriz de priorización (CEDEX, 2012). El proceso de completado de datos se puede realizar con todas las estaciones o bien con grupos de estaciones indicados. Con este método el modelo rellena los datos mensuales faltantes con las dos estaciones que mejor coeficiente de correlación presenta en el grupo de estaciones seleccionadas.

Se conforma un nuevo archivo en formato LEMA con todas las estaciones rellenas. Este luego se utilizará junto con los pesos de ponderación areal para obtener la precipitación media en cada subcuenca, para cada mes de la serie de trabajo.

Para obtener la precipitación media areal de la cuenca, solamente se utilizan aquellas estaciones que tienen influencia en dicha cuenca. Las precipitaciones mensuales se ponderan según el porcentaje de participación de su área de influencia en relación del área total de cada subcuenca. Puede una estación participar en el área de influencia de más de una subcuenca.

Archivo de la evapotranspiración potencial media areal

Para la determinación de la evapotranspiración potencial media de una subcuenca se utiliza la misma metodología expresada con la precipitación, considerando en este caso la variable evapotranspiración potencial. Por lo que previamente se calcula la misma en cada una de las estaciones donde se tienen registros de datos climáticos.

El programa ofrece el cálculo de la evapotranspiración potencial por los métodos de Thornthwaite, Blaney-Criddle y Penman Monteith. Los dos primeros son experimentales y el tercero tiene una base más física del proceso por lo que se lo considera más apropiado de utilizar si se disponen de todos los datos necesarios.

Para la determinación de la ETP mediante Penmann- Monteith se requieren datos mensuales de:

- temperatura media (°C),
- humedad relativa (%),
- heliofanía efectiva (hs/mes) y
- velocidad de viento (km/día)

Todas las estaciones deben contar con las series completas de estas cuatro variables climáticas mensuales en el período de análisis. En caso de ser necesario se pueden completar

con el programa utilizando el mismo procedimiento explicado para el rellenamiento de la precipitación.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial en cada estación, el modelo requiere un archivo de parámetros con datos de las coordenadas en grados minutos y segundos, altura del anemómetro, coeficiente de albedo, relación entre la velocidad del viento diurno y nocturno, y la altura en metros sobre el nivel medio del mar de la estación.

Se requiere indicar los pesos que cada estación tiene según el porcentaje de área de influencia de la estación en relación al área total de cada cuenca. Estos pesos se obtienen del trazado de los polígonos de Thiessen con las estaciones climáticas disponibles.

Para la determinación de la serie mensual de evapotranspiración potencial areal de cada subcuencas se utiliza el archivo que tiene la evapotranspiración mensual de todas las estaciones en el periodo de análisis y los pesos obtenidos con el trazado de los polígonos. Sólo se utilizarán las estaciones que tienen contribución en cada subcuenca.

Archivo de caudales

Un archivo de caudales mensuales observados es necesario para realizar la calibración. El mismo debe también estar en formato LEMA y puede contener datos faltantes, los que serán indicados con el valor "-100" Cuando falte un dato mensual en un año, el valor anual será faltante también.

2.1.3.2. CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO

Luego de la confección de los archivos necesarios para la implementación del modelo, se procede a las etapas de "calibración", "verificación" y "simulación", lo que sería la explotación del modelo.

Se considera la etapa de **calibración** aquella en la cual un conjunto de parámetros del modelo son ajustados para obtener la mejor coincidencia entre los datos observados y los que resultantes de usar estos parámetros. Para ello se comparan, en un periodo denominado de calibración, los valores registrados y los simulados por el modelo con el juego de parámetros adoptados. Existen diferentes índices que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos medidos y los resultados del modelo. En este periodo está contemplado el periodo de ajuste inicial del modelo.

En el proceso de **validación** se opera el modelo con los parámetros determinados en la etapa de calibración y se verifica la reproducción de datos históricos. No siempre es posible validar adecuadamente un modelo, debido a que no es posible medir todas las variables involucradas en el mismo con el nivel de exactitud adecuado, o a que la escala espacial o temporal del modelo lo hace imposible. Esta etapa de comprobación predictiva del modelo, se realiza aplicando los parámetros de calibración durante un período no empleado para ésta, denominado período de validación o verificación.

Como criterio general acerca de la longitud de serie a utilizar para calibración y verificación, se adopta que 2/3 a 3/4 partes de la serie disponible será utilizada para calibración y 1/3 a 1/4 para verificación.

Se denomina **simulación** a la corrida que se realiza, una vez calibrado y validado el modelo, con la finalidad de extender series y rellenar lagunas de la serie histórica, además de la posibilidad de proponer diferentes escenarios futuros.

La aplicación y calibración del modelo para cada subcuenca requiere de la carga de los siguientes archivos de formato LEMA:

- Precipitación media areal (codificado en el modelo CHAC: PMA)
- Evapotranspiración media areal (codificado en el modelo CHAC: EPA)
- Caudales registrados (codificado en el modelo CHAC: AMQ)

Además del área de aporte de la cuenca, el período de calibración, número de días de lluvia por mes y el número de ramas de descarga a considerar, según muestra la Figura 7.

Luego de la carga de estos datos, se requiere el ingreso de los parámetros de calibración, algunos de los cuales pueden ser obtenidos inicialmente mediante las características del sistema físico. La capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (HMAX), la capacidad de infiltración máxima del suelo (IMAX), el parámetro de excedencia (C), y el coeficiente de descarga del acuífero (α) son los cuatro parámetros principales que utiliza el modelo. La Figura 8 presenta un ejemplo de dicha pantalla.

Aportaciones - Calibración: Datos iniciales Proyecto: Q01 Piray Mini

Variables medias en cuenca:

Precipitaciones C:\Archivos de programa\Chac\Proyectos\Q01 Piray Mini\PParea.txt

ETP C:\Archivos de programa\Chac\Proyectos\Q01 Piray Mini\ETParea.txt

Caudales registrados para calibración:

Caudales C:\Archivos de programa\Chac\Proyectos\Q01 Piray Mini\Q01vhe.txt

Año hidrológico inicial : 1970 / 71

Año hidrológico final : 1995 / 96

Superficie de la cuenca : 1220.1 Km²

Número de días de lluvia por mes: 30 1 a 30

Número de ramas de descarga : 2 Máximo 2 ramas

Aceptar Cancelar

Figura 7. Ejemplo de la pantalla de inicio de calibración.

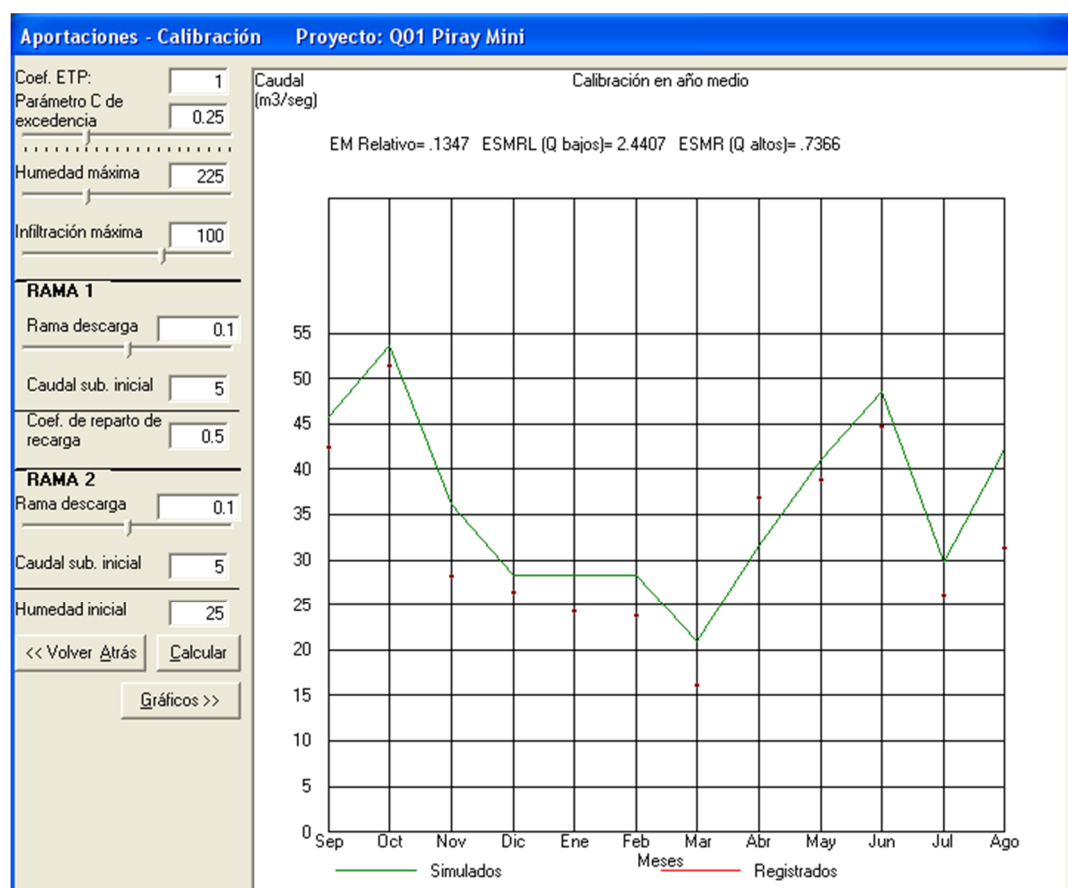


Figura 8. Ejemplo de la pantalla de calibración del modelo CHAC.

Durante el proceso de calibración se busca obtener juegos de valores para los cuatro parámetros mencionados de tal manera de lograr el mejor ajuste posible entre las series de caudales simulados y las series de caudales observados. La calibración es una etapa fundamental de la modelación y determina el nivel de confiabilidad del modelo para aplicaciones posteriores.

La calibración del CHAC es manual y se apoya en la evaluación estadística de errores y en la comparación visual de los hidrogramas observados y simulados. Los errores calculados por el modelo son los obtenidos por medio de las Ecuaciones 4,5 y 6:

Error medio: Índice de ajuste para volúmenes medios

$$emr = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Qsim_i - Qobs_i}{\bar{Qobs}} \quad (4)$$

Error cuadrático-estandarizado medio, relativo al caudal medio registrado: Índice de ajuste de caudales altos

$$esmr = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Qsim_i - Qobs_i}{\bar{Qobs}} \right)^2} \quad (5)$$

Error cuadrático-estandarizado medio, relativo a cada caudal registrado: Índice de ajuste en caudales bajos

$$esmrl = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Qsim_i - Qobs_i}{Qobs_i} \right)^2} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta los objetivos del trabajo, el criterio para considerar al modelo de simulación de caudales mensuales calibrado es que $emr < 10\%$. Para validación se admite un error mayor.

También es conveniente calcular el **error relativo “E”** que es el cociente entre el error absoluto y el valor exacto y generalmente se expresa en porcentaje (%) y se muestra en la Ecuación 7.

$$E (\%) = \frac{Q_{obs}-Q_{est}}{Q_{obs}} * 100 \quad (7)$$

Siendo:

Qobs: caudal observado medio mensual (m³/s)

Qest: caudal estimado medio mensual (m³/s)

En resumen las etapas que se realizan para la aplicación del programa CHAC son las siguientes:

1. Creación de proyectos
2. Características, tipo y generación de archivos en formato LEMA de entrada de datos
3. Ploteo de series temporales
4. Diagramas de barras o disponibilidad de datos
5. Estadísticos
6. Dobles masas o dobles acumuladas
7. Completamiento de lagunas y vacíos en las series temporales
8. Ponderación areal de series LEMA
9. Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP)
10. Parametrización de la cuenca simulada
11. Modelo de Témez, Calibración y Simulación

2.2.MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAMPOS AREALES

La aplicación de modelos de estimación de caudales de tipo concentrado o agregados a nivel de cuencas, o subcuencas, requiere información de las variables hidrológicas de entrada a los modelos que resuma el comportamiento areal de la misma. Es decir la precipitación que cae sobre la cuenca o la evaporación y evapotranspiración que tiene lugar sobre la misma. Estos datos son registrados en forma puntual en las estaciones, los que luego deben ser tratados para extenderlos al área de interés.

Se pretende entonces conocer en el espacio cuales son los valores que adoptan esas variables, en un tiempo dado, y en lo posible definir de qué tipo es la relación entre dos sitios de mediciones y cómo puede expresarse en términos funcionales. Esto dependerá de la vinculación o relación entre los sitios y se podrá de este modo determinar cuál es la estructura de variación espacial que presenta.

Partiendo del supuesto que las variables naturales tienen una componente determinística y una aleatoria, la Estadística nos proporciona una descripción del campo de observaciones en un determinado estadio, y la Geoestadística complementa esta visión, considerando que este campo de observaciones no es único

Matheron, definió a la “Geoestadística” como: “la ciencia del estudio estadístico de los procesos geológico”, y en su obra de 1971, como “la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio” (Matheron, 1971). Su objetivo fundamental es el análisis de la estructura de correlación de las variables a partir de su consideración como variable regionalizada.

Una variable regionalizada se define como una variable aleatoria distribuida en el espacio y con una estructura espacial de variación. El fenómeno representado por éstas se denomina regionalización (o regionalización geoestadística), (Damilano y Paris, 2014).

La Geoestadística se ocupa de obtener estimaciones de las variables regionalizadas a partir del conocimiento de su estructura de variación espacial (Barbosa Landim, 1997). Para ello es necesario conocer cuál es la función que gobierna su ocurrencia o dicho de otro modo cuál es la función (estadística-matemática) que representa esta variación espacial.

En la Estadística clásica o convencional, esta función se estima a partir de una muestra (Estadística Inferencial). Así, con la muestra –representativa de la población en estudio- se calculan los estadísticos, con ellos los parámetros y con estos últimos la ley de probabilidad que ajusta a la distribución de frecuencias observadas: Normal, LogNormal, Gumbel, etc.

El problema, es que en el caso de las VR, se cuenta generalmente, o mejor dicho casi siempre, con un resultado único $Z(x_i)$, que son precisamente los valores que se han medido u observado en el área de estudio. Por ello es necesario realizar la inferencia o estimación de su estructura probabilística bajo ciertas hipótesis.

Para ello la Geoestadística utiliza una restricción llamada hipótesis intrínseca, que permite el uso de los resultados de una VR por medio del método de los momentos. Según la teoría de probabilidad, una serie de k variables aleatorias (VA) z_1, z_2, \dots, z_k (en general no independientes) define un vector de VA o vector aleatorio z con k componentes. Cuando el número de componentes tiene a infinito (esto es el número de VA es infinito) z se llama función aleatoria (FA). Luego, la interpretación probabilística de una VR como una realización de una función aleatoria FA tiene sentido operativo sólo si es posible inferir su función de distribución o ley de probabilidad o al menos los parámetros que caracterizan esta distribución (Carrera y Samper, 1985).

Es decir deberíamos conocer los parámetros de cada una de las distribuciones de las variables analizadas en cada uno de los puntos de medición y la Geoestadística ofrece herramientas para ello.

En resumen, para evaluar la precipitación (P) espacialmente sobre una cuenca, subcuenca o cualquier superficie definida, existen varios métodos. El más simple es la media aritmética de los valores registrados en las estaciones. En este caso la variación espacial de la precipitación frente a una densidad insuficiente de la red pluviométrica puede llevar a errores considerables, Principalmente en zonas montañosas que presentan gran variación espacial de la precipitación.

Otros métodos disponibles para su estimación, y aplicados en este trabajo, son mediante el trazado de los polígonos de Thiessen, la regionalización de estaciones o el empleo de técnicas de kriging.

En relación de la evapotranspiración la medición se da por medio de dispositivos instalados en los abrigos o por lisímetros y parcelas experimentales, pero su obtención es laboriosa y costosa. Se recurre entonces a la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) a través de fórmulas empíricas en función de datos meteorológicos. Entre las fórmulas más utilizadas se encuentra la de Thornthwaite, pero se le critica que sólo usa datos de temperatura y que suele sobreestimar. Es por ello que se considera más adecuado, en la medida que se disponga de los datos necesarios, utilizar la fórmula de Penman- Montheith, que considera para su cálculo un término radiativo y otro aerodinámico, requiriendo datos de temperatura, velocidad de vientos, heliofanía y tensión de vapor, posibles de obtener de estaciones sinópticas, junto con otros datos de tablas donde se considera la ubicación y la época del año (Chow, 1996; Tucci, 2000; UNESCO, 2006).

Los procedimientos de técnicas de obtención de campos areales pueden ser aplicados indistintamente a cualquier variable hidrológica que se desea representar en forma espacial, por lo que por simplicidad, las explicaciones son referidas sólo a la precipitación.

Para la estimación de la precipitación media de la cuenca, es necesario disponer de datos de precipitación de estaciones meteorológicas dentro de la cuenca y su periferia, en un periodo común de tiempo. A partir de dicha información se puede ponderar la aportación espacial de cada sitio a través de varios métodos.

2.2.1. MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN

El método de Polígono de Thiessen se basa en ponderar el valor de la variable, por ejemplo precipitación, en cada estación en función de un área de influencia (A_i), superficie que se calcula según un procedimiento de trazado de polígonos. El procedimiento asume que en el área de influencia, definida por la poligonal, ocurre el mismo valor de lluvia de aquel observado en la estación meteorológica más cercana. La Ecuación 8 indica cómo se obtiene la precipitación media por medio de la ponderación.

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A} \quad (8)$$

Siendo:

P_m : precipitación media de la cuenca

P_i : precipitación de la estación i

A_i : área de influencia de la estación i

A : área total de la cuenca

n : cantidad de estaciones que influyen en la cuenca

La desratización del dominio bajo análisis y, la posterior estimación de la P y ETP promedio para cada subcuenca supone que la variabilidad de estos componentes es lineal entre los sitios de medición y no considera ni la variabilidad espacio-temporal de la variable en sí misma (variaciones intra-anales e inter-anales) ni la aleatoriedad propia de los fenómenos naturales.

Es un método comúnmente utilizado por su practicidad, pero se lo considera inadecuado en algunos casos, ya que es netamente geométrico, y no tiene en cuenta las características orográficas o de barreras naturales que pudieran existir entre las estaciones ni las características convectivas de algunas lluvias.

Para la estimación de la precipitación media de la cuenca, es necesario disponer de datos de precipitación de estaciones meteorológicas dentro de la cuenca y su periferia, en un periodo común de tiempo.

Para determinar los polígonos de Thiessen en el mapa base donde están delimitadas las cuencas, se utilizó el ArcGIS® software by Esri con una subrutina a tal efecto. A partir de conocer la ubicación de las estaciones, trazar los polígonos y recortarlo según los límites de las cuencas, se puede ponderar la aportación espacial de cada sitio en relación al área total de la cuenca.

La obtención de la precipitación media areal en cada subcuenca se obtiene mediante la Ecuación 8. La misma es calculada, para cada mes de la serie de trabajo, en forma automática por el programa CHAC. Utiliza un archivo en formato LEMA con la precipitación mensual de todas las estaciones, junto con los pesos de ponderación areal ingresados manualmente o por archivo.

2.2.2. MÉTODO DE REGIONALIZACIÓN

La regionalización hidrológica es una metodología que permite generar información en un sitio, en base a información conocida en otras áreas que posean un comportamiento hidrológico semejante.

La regionalización hidrológica puede ser realizada tanto a variables como a funciones de respuestas. Para el primer caso, se pretende que pueda ser determinada en una región en base a las relaciones establecidas con los datos puntuales existentes. Es como extender en el espacio el dominio de la información puntual. Un ejemplo sería el mapa de isohietas de una cuenca, donde a partir de los valores puntuales de precipitación en cada estación, se trazan curvas que representan puntos de igual precipitación. La confiabilidad de estas curvas dependerá de la calidad de los datos utilizados (registrados) y del supuesto de que la variabilidad entre las estaciones es lineal, situación que puede ser considerada válida si la distancia entre las estaciones no es grande, si no existen interferencias orográficas y si los procesos de lluvia no han sido convectivos.

En el caso de la regionalización de una función hidrológica se intentan relaciones entre variables, una será la dependiente o de respuesta y otras serán las independientes o también llamadas explicativas. Tal es el caso de la regionalización de caudales (variable dependiente) en función de las variables explicativas como área de la cuenca, precipitación media, pendiente, densidad de drenaje, etc. (Tucci, 2002).

De aquí surge la importancia de la representatividad espacial de la información que se registra en una cuenca. Las redes de estaciones que registran datos deben tener la suficiente densidad para manifestar las variaciones del terreno, del clima y del comportamiento hidrológico. Cuando esto no sucede los métodos de regionalización deberán ser utilizados, los que por supuesto deberán cumplir con determinados criterios que garanticen la extensión de la información y la coherencia de los resultados.

Varias investigaciones dan cuenta del empleo de métodos de regionalización con el fin de obtener zonas cuyos montos de precipitaciones presenten cierta homogeneidad. Entre ellos podemos mencionar a Nouvelot et al. (1995) presenta la regionalización pluviométrica del Ecuador a partir de datos de montos anuales con análisis de los valores diarios. Terra y Pisciotano (1994) determinan regiones pluviométricas homogéneas para Uruguay respecto a régimen anual de las precipitaciones a partir del análisis de agrupamiento. Carvajal Escobar y Segura (2002) presentan una regionalización de las precipitaciones mensuales para el Valle del Cauca (Colombia).

En los últimos años el uso del análisis de agrupamiento en el campo de la hidrología ha sido exitoso. Muestra de ello son las aplicaciones que ha tenido en la regionalización de cuencas para el análisis de frecuencia de caudales máximos y mínimos, la estimación de tormentas de corta duración, la determinación de zonas ciclónicas y la determinación de regiones homogéneas de precipitación, entre otras (Castro Heredia et al., 2012). Por ejemplo, Darand y Mansouri Daneshvar (2014) muestran una interesante aplicación del análisis de agrupamiento con el análisis de componentes principales para la regionalización del régimen de precipitación en Irán. Fassnacht, S. y J. E. Derry (2010) definieron regiones homogéneas de acumulación de nieve para la cuenca del Río Colorado, empleando el método de Ward. Vilchis-Francés et al (2009) proponen tratamientos para la optimización de la red de mediciones pluviométricas del Estado de México así como Paris et al. (2004) proponen metodologías para la regionalización de caudales en Argentina.

Para la obtención de las regiones se utilizaron dos métodos:

- Método Cluster
- A partir de los L-momentos

En esta tesis se ha utilizado el método de Ward de clusterización. Se trata de un procedimiento jerárquico de análisis en el cual, la pérdida de información que se produce al integrar los distintos individuos en clusters puede medirse a través de la suma total de los cuadrados de las desviaciones entre cada punto (individuo) y la media del cluster en el que se integra. Para que el proceso de clusterización resulte óptimo, en el sentido de que los grupos formados no

distorsionen los datos originales, Ward propuso la siguiente estrategia: en cada paso del análisis, considerar la posibilidad de la unión de cada par de grupos y optar por la fusión de aquellos dos grupos que menos incrementen la suma de los cuadrados de las desviaciones al unirse.

El método de Ward es uno de los más utilizados en la práctica; ya que resulta más discriminativo en la determinación de los niveles de agrupación, sin perder las ventajas del método de la media. Kuiper y Fisher (1975) han probado que este método es más eficiente para obtener la clasificación óptima que otros métodos (mínimo, máximo, media y centroide) y que además es menos sensible a datos atípicos.

Para aplicar el método cluster de Ward se empleó el modelo PAST (Hammer et al., 2001) donde mediante el menú "Multivariado", en la opción "Análisis de Cluster" se ingresan los datos de las variables, por ejemplo una matriz de "m" estaciones por 12 precipitación media mensual de una serie de "n" años y el resultado es un dendrograma que muestra las agrupaciones de las estaciones en función de la varianza (distancia).

Para la determinación de la cantidad de regiones a conformar se debe adoptar un nivel de corte del dendrograma. A partir de allí queda indicada la cantidad de regiones y cuáles son las estaciones que la conforman.

Cuando se aplica el método de cluster, la robusticidad del método permite ver como son los agrupamientos independientemente del nivel de corte que se adopte. En este sentido se puede elegir un nivel de corte considerando las estaciones que participaran en cada agrupamiento y en función de este análisis decidir aumentarlo o disminuirlo.

La cantidad de grupos que se adopten deben representar los diferentes comportamientos que se presenten, no tendrá sentido realizar pocos agrupamientos si el comportamiento que se analiza es muy variado ni viceversa. Entonces la adopción de cuantos grupos y la cantidad de estaciones en cada uno de ellos debe ser analizada en el contexto del fenómeno que se estudia y examinando las estaciones que participarán en cada grupo.

Una vez que se adopta el nivel de corte y se determina cuantas regiones y cuáles estaciones en cada región se procede al cálculo de la precipitación que representa la región.

Por su parte el Método de regionalización en base a los L-momentos se puede llevar a cabo mediante el empleo del programa "ICI-RAFT" v.1.1 (Giovannettone et al., 2013) desarrollado por el Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWaRM por sus siglas en inglés), el mismo realiza los agrupamientos con un criterio estadístico basado en el uso de los L-momentos.

El programa ICI-RAFT, fundamentalmente sirve para realizar análisis de frecuencia regional, donde la principal premisa es que los datos de sitios dentro de una región homogénea se pueden agrupar para mejorar la confiabilidad de las estimaciones de magnitud o frecuencia para todos los sitios. El desafío está en la determinación de los grupos que pertenecen a una misma región homogénea.

Una región homogénea puede ser un área geográfica delimitada en un mapa o puede ser un conjunto de sitios (estaciones) con características similares del fenómeno investigado. Está implícito en esta definición la condición de que todos los sitios de una región pueden ser descritos por una distribución de probabilidad que tienen parámetros comunes y que se denomina “curva regional de frecuencia” o “curva de crecimiento regional”.

Por lo tanto, todos los sitios dentro de una región homogénea tienen una curva común de frecuencia regional, que es una función adimensional común a todos los sitios dentro de una región homogénea y representa la función de densidad de la distribución regional de frecuencia. Se tiene entonces que la única diferencia entre los sitios en su función de cuantiles, está dada por un factor de escala que es propio de cada sitio (Hosking y Wallis, 1997). En este sentido la Ecuación 9 representa lo expresado:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F) \quad (9)$$

Siendo

$Q_i(F)$ la inversa de la función de distribución acumulada o de cuantiles del sitio, da la magnitud de la variable para una determinada probabilidad de no excedencia

μ_i es un factor de escala por ejemplo la media del sitio

$q(F)$ es la curva de crecimiento regional, o función de cuantiles adimensional que representa la región

Al decir que una región homogénea es un conjunto de sitios que tienen valores regionales comunes, tendrán por lo tanto los mismos estadísticos. Según Hosking (1992) el uso de estadísticos obtenidos como combinación lineales de momentos (L-momentos) son preferibles a los estadísticos convencionales sobre todo para muestras de tamaño pequeño y series de datos con asimetría moderada a alta como se encuentra comúnmente en los datos ambientales.

Como antecedentes fundamental de aplicación de esta metodología se menciona la “Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina” confeccionada por el Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC) y la colaboración de

la Universidad de Gante, Bélgica y la Universidad Autónoma de Baja California, México. Esta guía fue editada por UNESCO en el año 2010.

Para la aplicación de esta metodología, Giovannette y Wright del Instituto de Recursos Hídricos del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, desarrollaron el programa ICI-RAFT con el empleo de los L-momentos, como los coeficientes de variabilidad por L-momentos (L-Cv), coeficiente de asimetría por L-momentos (L-Skewness) y coeficiente de curtosis por L-momentos (L-Kurtosis) y la relación entre ellos.

En resumen, previo al análisis de frecuencia regional se requiere contar con las regiones homogéneas, las que pueden ser obtenidas mediante el programa ICI-RAFT y que se utilizó en esta tesis. El programa arma la cantidad de regiones que se le solicitan, pero no propone cual es la cantidad óptima de regiones a conformar. Se intuye que será una cantidad suficiente como para que los grupos sean representativos de la variabilidad que tenga la región, pero la pregunta de cuantas no puede ser resuelta con este modelo. Sirve de apoyo a esta decisión la aplicación previa del método Ward que por medio del dendrograma muestra cuantos grupos es conveniente considerar.

Una vez decidida la cantidad de grupos, se lo ingresa en el programa ICI-RAFT y el mismo devuelve el conjunto de estaciones que participa en cada grupo junto con sus valores de L-momentos individuales y los de cada región conformada. La Figura 9 muestra una pantalla de regionalización realizada con el programa. Del lado derecho se muestran las características de la región definida y del lado izquierdo las características de cada una de los sitios analizados y que pertenecen a dicha región.

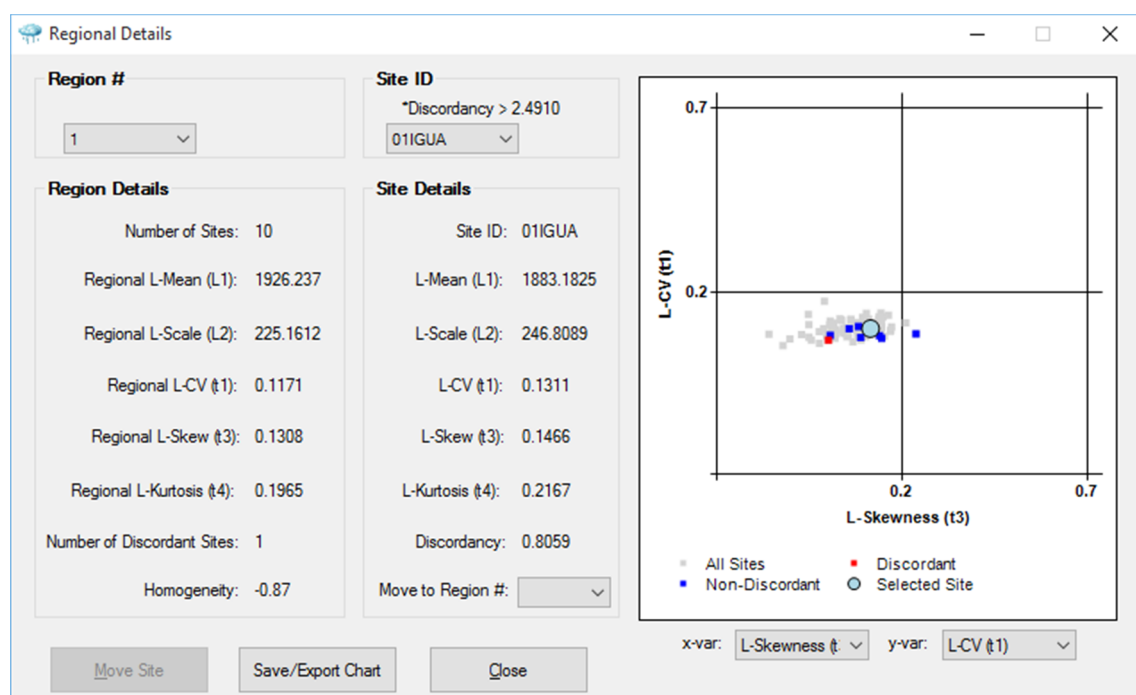


Figura 9: Determinación de regiones homogéneas con el programa ICI-RAFT.

Se aprecia en la misma un punto rojo que corresponde a una estación discordante. En el proceso de agrupar sitios para las regiones homogéneas propuestas, es una práctica estándar calcular una medida de discordancia (D_i) para cada sitio (Hosking y Wallis, 1997). La medida de discordancia se utiliza para ayudar a identificar aquellos sitios cuyos L-momentos son discordantes (marcadamente diferentes) en relación a los L- momentos para el conjunto de los sitios. Específicamente, los sitios con una medida de discordancia mayor que 3 se consideran discordantes con respecto al comportamiento colectivo de la agrupación propuesta.

En los métodos de regionalización, se pretende definir que estaciones pertenecen a cada región, pero no hay que perder de vista cual sería la cantidad conveniente de estaciones por región. Si para una cantidad determinada de estaciones, una mayor cantidad de regiones implica menor cantidad de estaciones en cada región, se debe considerar cual es la cantidad mínima de estaciones que se pueden tener por región. Según la Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos (UNESCO, 2010), Hosking y Wallis sugieren que sean 7 con el propósito de tener una buena estimación de la discordancia de las estaciones, es decir, ver cuando una estación en forma individual no concuerda con el resto de las ecuaciones de la región propuesta. Si por el contrario a medida que se considera un menor número de regiones para que contemplen mayor cantidad de estaciones en cada una, se estará perdiendo el sentido de la regionalización.

Para la obtención de las precipitaciones medias de las cuencas se adoptó el siguiente procedimiento, ya sea que los agrupamientos se hayan obtenidos por el método cluster o por L-momentos:

Con todas las estaciones dentro de una misma región definida se calcula el promedio para cada mes, y se reemplazan los valores originales de cada estación por el promedio mensual así obtenido. Este promedio mensual que reemplaza el valor registrado en el sitio se considera representativo del comportamiento de la región, lo que suavizaría la información local.

Finalmente se aplica el método de Thiessen para obtener los pesos areales y ponderar la precipitación mensual, en este caso media de la región, por el área de influencia en relación al área total de la cuenca. La precipitación areal de la cuenca es la suma de las precipitaciones de cada estación ponderada por su área de influencia, según se muestra en la Ecuación 8.

2.2.3. MÉTODO DE KRIGING

El kriging es una técnica de interpolación que se basa en el análisis de la estructura geoestadística de variación de la variable. Es decir se apoya en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio, con la premisa que puntos próximos en el

espacio, tendrá valores más parecidos que puntos más alejados, ya que asume que una muestra de puntos de una población se encuentra correlacionada en el espacio.

El comportamiento de la precipitación, al igual que la evapotranspiración, cumplen con esta premisa, por lo que es posible aplicar esta técnica de predicción de puntos, para obtener sus campos espaciales.

La semivariancia es la medida del grado de dependencia espacial entre dos muestra, su representación gráfica en función de la distancia a un punto está dada por el semivariograma, también llamado variograma, el cual es obtenido a partir de una muestra de la variable (semivariograma experimental), a la que se debe ajustar un modelo teórico. Entre los modelos más comunes se encuentran el lineal, el exponencial, el esférico y el gaussiano. Este último modelo señala que el fenómeno evaluado, tiene poca variación en los puntos cercanos y suavemente creciente a medida que la distancia aumenta, hasta alcanzar la meseta en la varianza total de la muestra.

De la forma del variograma modelado se extraen los parámetros del modelo que se utilizarán para la interpolación, ellos son la pepita, la meseta y el alcance. La pepita representa el valor de la varianza para la distancia cero, es indicativa de la variabilidad en los datos a pocas distancias (que puede deberse a errores en la obtención de los datos, marcada variabilidad indicativa de procesos fuertemente aleatorios y/o que la separación de los puntos de observación no es suficiente para representar el fenómeno que se está cuantificando); la meseta se define cuando la semivariancia no aumenta más con la distancia y se estabiliza en un valor igual a la varianza de la muestra y; el alcance es la distancia que corresponde a la definición de la meseta.

El análisis de la estructura de variación espacial de la variable, sintéticamente presentado en los párrafos precedentes, es el paso previo ineludible para la aplicación del kriging como método de interpolación. Es decir antes que nada se debe conocer el modelo de variograma ajustado, esto significa: el tipo de modelo y los parámetros del mismo. Además es necesario establecer el tipo de interpolación deseada (puntual o por bloques) y la estrategia adecuada para la selección de puntos para la interpolación en el rango de búsqueda (que podrá ser circular o elipsoidal dependiendo del comportamiento direccional del variograma). Los datos más allá del alcance, es decir cuando el variograma se vuelve plano, tienen la mínima capacidad predictora y por ende no intervienen en la interpolación. Según Zucarelli et al. (2014) "Si el número de valores en el espacio es suficiente, la mejor estrategia para evitar problemas de estacionariedad puede ser disminuir el radio de búsqueda". El resultado final del kriging es un mapa con los valores interpolados de la variable.

Sin embargo, es importante recordar que el kriging no es el único método de predicción espacial; existen métodos determinísticos como distancia inversa, interpolación polinomial global, interpolación polinomial local, triangulación lineal, funciones de base radial entre otros. Incluso puede resultar que luego del análisis de la estructura de variación espacial el variograma experimental muestre un comportamiento totalmente aleatorio (efecto pepita puro) o lineal. En el primer caso no se deberían trazar mapas con curvas, pues este comportamiento señala que la variable no tiene continuidad espacial (caso común de los fenómenos que se manifiesta a escala muy local, como las fuentes de contaminación puntual en aguas subterráneas o tormentas locales en el caso de precipitaciones diarias). En el segundo, el análisis estructural sirve para argumentar la correcta utilización de la interpolación lineal.

La ventaja adicional del kriging sobre los métodos determinísticos, es la estimación de la varianza del error de predicción, lo cual permite además estimar intervalos de confianza para las predicciones realizadas (o eventualmente curvas trazadas). Kriging es un método de estimación que da el mejor estimador lineal insesgado (BLUE: Best Linear Unbiased Estimator), cuando se cumplen todos los supuestos para su utilización.

Son numerosos los ejemplos de aplicación de kriging para la obtención de curvas de isovalor: Cortéz et al. (2005), Demey et al. (1996), Íñiguez et al. (2011), Izquierdo et al. (2006), Mejía et al. (1999); entre otros. En el caso particular de las curvas isohietas se pueden mencionar los resultados logrados por Pineda et al. (2011) y Guerra et al. (2006) y concretamente en Argentina Mezher et al. (2009) y Hämmerly et al. (2012c), entre otros.

2.2.4. CONSIDERACIONES EN LA APLICACIÓN DE CAMPOS AREALES

En primer lugar es conveniente presentar algunas definiciones. Se entiende por “precipitación areal” aquella que cae sobre toda la superficie de la cuenca y resulta sinónimo de superficie media de la cuenca en sentido espacial. Por “precipitación media areal” se considera como aquella precipitación sobre toda la superficie de la cuenca, pero que esta promediada en el tiempo, por ejemplo una serie de años, o una serie de valores del mismo mes. Conceptos similares son considerados para la evapotranspiración.

Al referirnos al método de Thiessen explicado en el apartado 2.2.1, con el mismo se obtiene una serie de tiempo de precipitación areal, es decir valores de precipitación sobre toda el área de la cuenca mes a mes para todos los años de la serie.

Con los métodos de agrupamientos se obtiene un valor promedio de cada estación por mes, el que resume el periodo de estudio. Al aplicarle la metodología de Thiessen se obtendrá para

cada cuenca un valor mensual que resume el comportamiento en el espacio y en el tiempo. Ya no se dispondrá de una serie de tiempo como con el apartado 2.2.1.

En cuanto al método de kriging, se logra para cada mes valores en el espacio promedios de una serie de año, del mismo modo que con regionalización por agrupamiento más Thiessen.

Una serie de consideraciones se deben tener en cuenta para los métodos presentados. En primer lugar mencionar

Luego de estas consideraciones, es conveniente mencionar que los campos obtenidos con estos dos últimos métodos, reflejan la variabilidad en el espacio de las componentes de precipitación o de evapotranspiración, pero también promediadas en el tiempo. Para que la variación se visualice temporalmente se deberán calcular una secuencia de campos a lo largo del periodo de análisis.

En la regionalización, la metodología propuesta utiliza valores promedios de un período y los asigna a todas las estaciones de cada región, lo que implica el promedio de cada meses de la serie de tiempo en cada región y asignar el mismo valor a todas las estaciones de una misma región. Para conseguir la variación temporal se deberá aplicar esta metodología a cada uno de los meses para todos los años, es decir enero del año 1, enero del año 2 y así hasta el año N, luego se continua con febrero del año1, febrero del año 2, y así sucesivamente.

Con el método de kriging, según la metodología explicada, mediante la interpolación usando el variograma se obtiene una grilla para cada mes con valores de la variable, que servirá de base para el trazado de mapas de precipitación media mensual de una serie de años. Para obtener una serie de tiempo con valores para cada mes del período total, se deberá confeccionar tantos mapas mensuales como años tenga la serie de análisis. Por ejemplo, el mapa de enero del año 1, el mapa de febrero del año 2 y así hasta el mapa de diciembre del año N.

Como se supone, la obtención mediante regionalización o kriging de los campos de las variables hidrológicas en forma de serie de tiempo, resulta una tarea muy laboriosa y sistemática que requiere del apoyo de programas para el procesamiento del gran volumen de información.

2.3.FUENTES DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

Para el cálculo de balance hídrico se requiere básicamente información hidrológica e hidrometeorológica: datos de caudal, precipitación y datos climáticos e información sobre las características de las cuencas de aporte, topografía, tipo de suelos y cobertura vegetal.

Se utilizaron datos hidrometeorológicos y meteorológicos de la Subsecretaría de los Recursos Hídricos de la Nación (SSRH), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) a paso de tiempo mensual. De forma genérica se denomina estación hidrometeorológica a aquellas que posean registros sólo de precipitación o también climáticos (Hämmerly, 2012b).

Para la calibración se trabajó básicamente con datos hidrométricos de estaciones de la SSRH, en las cuencas con secciones de aforos.

A continuación se indican las fuentes de información y una síntesis de los datos recopilados, detallándose la disponibilidad temporal de la misma

2.3.1. SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA NACIÓN

A través de la base de datos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación se obtuvo información mensual de caudales, precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad de viento, heliofanía efectiva y evaporación (SSRH, 2010b).

La Tabla 3 resume las estaciones hidrométricas de las cuales se ha recopilado información, la ubicación y los períodos de registros. De estas estaciones se disponen datos de caudales mensuales. Se destaca que se seleccionaron estaciones con registros mayores a 10 años.

El ordenamiento de las estaciones se corresponde con el sentido de aguas arriba hacia aguas abajo a lo largo de los ríos principales. De este modo se comienza con la primera estación al norte dentro de la cuenca del río Paraná, y se va recorriendo hacia aguas abajo por margen izquierda. Luego se contabilizan las estaciones de la cuenca del río Paraná por margen derecha, se continúa con las del Paraguay y finalmente se consideran las estaciones desde aguas arriba hacia aguas abajo para la cuenca del río Uruguay del lado argentino.

Del mismo modo se ordenan las estaciones que contemplen otras variables para tener una secuencia lógica en el recorrido de las mismas.

Tabla 3. Estaciones de datos hidrométricos suministrados por la SSRH.

Est.	Río	Lugar	Pcia.	Lat.	Long.	Registros	
						Inicio	Fin
3448	Iguazú	Puerto Andresito	Misiones	-25.59	-53.99	01/09/1983	31/12/2011
3407	Piray Miní	Valle Hermoso	Misiones	-26.36	-54.50	01/06/1962	29/02/2012
3403	Piray Guazú	Pinar Ciba	Misiones	-26.51	-54.46	01/01/1959	29/02/2012
3414	Paranay	El Alcázar	Misiones	-26.75	-54.76	01/03/1972	29/02/2012
3862	Paraná	Itatí	Corrientes	-27.27	-58.24	01/09/1910	01/08/2012
3805	Paraná	Corrientes	Corrientes	-27.47	-58.85	01/01/1904	31/08/2012
3836	Santa Lucía	Santa Lucía	Corrientes	-28.99	-59.10	01/11/1975	31/08/2012
3803	Corriente	Paso Lucero	Corrientes	-28.99	-58.56	01/08/1968	31/08/2012
3849	Batel	Paso Cerrito	Corrientes	-29.03	-58.79	01/05/1988	31/08/2012
3821	Corriente	Los Laureles	Corrientes	-29.76	-59.22	01/09/1975	31/08/2012
3810	Barrancas	Paso La Llana	Corrientes	-30.22	-59.32	01/11/1975	31/08/2012
3808	Guayquiraró	Paso Juncué	Corrientes	-30.36	-59.26	01/09/1975	31/08/2012
3003	Feliciano	Paso Medina	E. Ríos	-30.92	-59.55	01/09/1975	31/08/2012
3037	Nogoyá	Ruta Prov. 11	E. Ríos	-32.84	-59.86	01/12/1984	31/08/2012
3004	Gualeguay	Rosario del Tala	E. Ríos	-32.31	-59.08	01/11/1992	31/08/2012
3340	Tapenagá	Florencia	Santa Fe	-28.03	-59.23	01/09/1970	31/08/2012
3231	Los Amores	V. Ocampo (RP32)	Santa Fe	-28.49	-59.39	01/11/1983	31/08/2012
3207	El Rey	Moussy	Santa Fe	-29.00	-59.75	01/10/1954	31/08/2012
3300	Malabrigo	Ruta Nac. 11	Santa Fe	-29.28	-59.79	01/09/1985	31/08/2012
3224	Malabrigo	Ruta Prov. 88 S	Santa Fe	-29.36	-59.78	01/10/1977	31/08/1994
3202	El Toba	Margarita	Santa Fe	-29.73	-60.01	01/09/1976	31/08/2012
3200	Saladillo Amargo	V. Mujica (RP81)	Santa Fe	-30.84	-60.41	01/09/1953	31/08/2012
3218	Saladillo Dulce	La Noria (RP81)	Santa Fe	-30.85	-60.28	01/11/1953	31/08/2012
3339	Paraná (1)	Pna-Sfe	Santa Fe	-31.63	-60.68	01/09/1905	31/08/2012
INA ⁽³⁾	San Antonio(2)	Petronila	Santa Fe	-30.67	-60.69	01/01/1984	31/08/2010
INA ⁽³⁾	Cululú (2)	Ruta Prov. 50 S	Santa Fe	-31.19	-60.94	01/09/1978	31/08/2010
3216	Salado	Ruta Prov. 70	Santa Fe	-31.49	-60.78	01/01/1954	31/08/2012

Est.	Río	Lugar	Pcia.	Lat.	Long.	Registros	
3247	Colastiné	Autopista	Santa Fe	-32.02	-60.99	01/11/1984	31/08/1999
3265	El Monje	Autopista	Santa Fe	-32.39	-60.94	01/09/1988	31/08/1999
3321	Saladillo	Autopista	Santa Fe	-33.03	-60.66	01/09/1984	31/08/1999
3318	Pavón	Cnel Bogado	Santa Fe	-33.36	-60.58	01/09/1988	31/08/2012
3260	Del Medio	La Emilia	Santa Fe	-33.40	-60.33	01/04/1993	31/08/2012
631	Pilcomayo	La Paz	Salta	-22.38	-62.52	01/12/1941	01/08/2012
2606	Paraguay	Puerto Pilcomayo	Formosa	-25.37	-57.65	01/01/1910	01/08/2012
693	Bermejo	Pozo Sarmiento	Salta	-23.22	-64.2	01/09/1940	31/08/2012
16	San Francisco	Caimancito	Jujuy	-23.73	-64.47	01/01/1947	31/08/2012
2602	Bermejo	El Colorado	Formosa	-26.33	-59.36	01/09/1968	01/08/2012
2401	Paraguay	Puerto Bermejo	Chaco	-26.94	-58.49	01/09/1910	31/08/1994
3442	Uruguay	El Soberbio	Misiones	-27.30	-54.19	01/05/1980	31/12/2011
3857	Uruguay	Garruchos	Corrientes	-28.18	-55.64	01/05/1931	31/12/2011
3858	Aguapey	Caa Carai	Corrientes	-27.82	-56.26	01/08/1986	31/12/2011
3811	Aguapey	La Sirena	Corrientes	-28.42	-56.54	01/05/1988	31/12/2011
3802	Uruguay	Paso de los Libres	Corrientes	-29.72	-57.08	01/01/1909	31/12/2011
3832	Miriñay	San Roquito	Corrientes	-29.30	-57.56	01/07/1968	31/12/2011
3804	Miriñay	Paso Ledesma	Corrientes	-29.85	-57.68	01/07/1968	31/12/2011
3061	Yuquerí Grande	Concordia (R.N.18)	E. Ríos	-31.36	-58.09	01/10/1991	31/08/2012
3030	Gualeguaychú	Ruta Prov. 39	E. Ríos	-32.45	-58.56	01/10/1988	31/08/2012

(1) La sección denominada río Paraná en Paraná-Santa Fe, se compone de la suma de los caudales en la estaciones río Colastiné en RN 168 (Est. 3249), Paraná en Túnel (Est. 3050) y Sistema Setúbal en Santa Fe-La Guardia (Est. 3339).

(2) Estaciones con período intermedio faltantes.

(3) Las estaciones indicadas como INA se obtuvieron de estudios antecedentes del organismo.

La Figura 10 esquematiza la red hidrográfica principal de la zona de estudio.

En relación a la información hidrometeorológica registrada por la SSRH, en la Tabla 4 se presentan los nombres y coordenadas de las estaciones pluviométricas, de las cuales se disponen registros. La ubicación de las mismas se muestra en la Figura 12. Por su parte en la Tabla 5 se resumen las variables meteorológicas que se disponen en sólo cuatro estaciones de la zona de estudio.

Tabla 4. Estaciones con registros pluviométricos de la SSRH.

Cod.	Río	Estación	Pcia	Latitud (°)	Longitud (°)	Registros	
						Inicio	Fin
678	Bermejo	Sta Victoria O	Salta	-22.25	-64.97	01/10/1982	28/02/2011
607	Bermejo	Alarache	Salta	-22.27	-64.58	01/12/1971	28/02/2011
638	Tarija	Astilleros	Salta	-22.37	-64.10	01/01/1971	28/02/2011
689	Bermejo	Trigo Huaico	Salta	-22.38	-65.04	01/10/1984	28/02/2011
631	Pilcomayo	La Paz	Salta	-22.38	-62.52	01/09/1964	28/02/2011
677	Iruya	Paltorco	Salta	-22.41	-65.09	01/10/1984	28/02/2011
679	Iruya	Tuc-Tuca	Salta	-22.42	-65.26	01/10/1982	28/02/2011
688	Iruya	Poscaya	Salta	-22.46	-65.08	01/10/1984	28/02/2011
676	Iruya	Nazareno	Salta	-22.51	-65.10	01/06/1983	28/02/2011
605	Bermejo	Balapuca	Salta	-22.52	-64.43	01/12/1971	28/02/2011
692	Iruya	El Pabellón	Salta	-22.53	-65.29	01/11/1984	28/02/2011
637	Tarija	San Telmo	Salta	-22.57	-64.24	01/10/1971	28/02/2011
691	Iruya	El Molino	Salta	-22.60	-65.15	01/12/1982	28/02/2011
604	Bermejo	Aguas Blancas	Salta	-22.73	-64.36	01/01/1945	28/02/2011
673	Iruya	Las Higueras	Salta	-22.75	-65.10	01/12/1982	28/02/2011
675	Iruya	San Isidro	Salta	-22.76	-65.24	01/12/1983	28/02/2011
672	Iruya	Iruya	Salta	-22.79	-65.22	01/10/1982	28/02/2011
629	Pescado	Cuatro Cedros	Salta	-22.80	-64.48	01/01/1964	28/02/2011
674	Iruya	San Antonio	Salta	-22.82	-64.97	01/09/1982	28/02/2011
655	Iruya	San José	Salta	-22.90	-64.72	01/11/1980	28/02/2011
693	Bermejo	P. Sarmiento	Salta	-23.22	-64.20	01/01/1945	28/02/2011
16	S. Francisco	Caimancito	Jujuy	-23.73	-64.47	01/01/1947	28/02/2011
2606	Paraguay	Pto Pilcomayo	Formosa	-25.37	-57.65	01/10/1988	28/02/2011
2602	Bermejo	El Colorado	Formosa	-26.33	-59.36	01/01/1966	28/02/2011
2610	Bermejo	Puerto Velaz	Formosa	-26.66	-58.63	01/12/1988	28/02/2011

Cod.	Río	Estación	Pcia	Latitud	Longitud	Registros	
2401	Paraguay	Pto Bermejo	Chaco	-26.94	-58.49	01/06/1985	28/02/2011
3448	Iguazú	Pto Andresito	Misiones	-25.59	-53.99	01/11/1984	28/02/2011
3452	Paraná	Ita Cajón	Misiones	-25.60	-54.59	01/11/1987	28/02/2011
3407	Piray Miní	V Hermoso	Misiones	-26.36	-54.50	01/02/1972	28/02/2011
3403	Piray Guazú	Pinar Ciba	Misiones	-26.51	-54.46	01/09/1964	28/02/2011
3428	Yabotí	San Pedro	Misiones	-26.63	-54.13	01/01/1960	28/02/2011
3414	Paranay	El Alcazar	Misiones	-26.75	-54.76	01/02/1972	28/02/2011
3441	Soberbio	San Vicente	Misiones	-27.00	-54.48	01/09/1977	28/02/2011
3432	Torto	A. del Valle	Misiones	-27.10	-54.89	01/09/1977	28/02/2011
3443	Uruguay	Pepiri Mini	Misiones	-27.15	-53.93	01/06/1984	28/02/2011
3408	Acaragua	Campo Grande	Misiones	-27.22	-54.97	01/09/1977	28/02/2011
3442	Uruguay	El Soberbio	Misiones	-27.30	-54.19	01/09/1977	28/02/2011
3404	Yabebirí	C. Mártires	Misiones	-27.40	-55.33	01/04/1972	28/02/2011
3449	Uruguay	San Javier	Misiones	-27.88	-55.13	01/12/1988	28/02/2011
3427	Uruguay	Pt. Concepción	Misiones	-28.10	-55.58	01/12/1988	28/02/2011
3805	Paraná	Corrientes	Corrientes	-27.47	-58.85	31/01/1982	28/02/2011
3864	Aguapey	San Carlos	Corrientes	-27.75	-55.90	01/01/1987	28/02/2011
3858	Aguapey	Caa Carai	Corrientes	-27.82	-56.26	01/10/1985	28/02/2011
3857	Uruguay	Garruchos	Corrientes	-28.18	-55.64	01/01/1986	28/02/2011
3848	Batel-Batelito	Concepción	Corrientes	-28.39	-57.90	01/06/1978	28/02/2011
3811	Aguapey	La Sirena	Corrientes	-28.42	-56.54	01/10/1977	28/02/2011
3826	Lag. Iberá	C Pellegrini	Corrientes	-28.53	-57.16	01/07/1968	28/02/2011
3874	Corriente	Chavarría	Corrientes	-28.96	-58.58	01/01/1976	28/02/2011
3836	Santa Lucia	Santa Lucia	Corrientes	-28.99	-59.10	01/06/1968	28/02/2011
3849	Batel	Paso Cerrito	Corrientes	-29.03	-58.79	01/06/1978	28/02/2011
3832	Miriñay	San Roquito	Corrientes	-29.30	-57.56	01/09/1974	28/02/2011
3893	Sarandí	Malvinas Sur	Corrientes	-29.71	-59.02	01/05/1976	31/01/2011
3802	Uruguay	Paso Libres	Corrientes	-29.72	-57.08	01/01/1991	28/02/2011
3877	Guayquiraró	E. Esperanza	Corrientes	-30.18	-58.29	01/01/1977	31/01/2011
3876	Guayquiraró	P Libertador	Corrientes	-30.22	-59.39	01/03/1983	28/02/2011
3808	Guayquiraró	Paso Juncué	Corrientes	-30.36	-59.26	01/05/1976	31/01/2011

Cod.	Río	Estación	Pcia	Latitud	Longitud	Registros	
3003	Feliciano	Paso Medina	E. Ríos	-30.92	-59.55	01/09/1988	28/02/2011
3005	Paraná	Chapetón	E. Ríos	-31.65	-60.28	01/01/1979	28/02/2011
3015	Del Doll	Ruta Prov. 11	E. Ríos	-32.31	-60.43	01/03/1989	28/02/2011
3340	Tapenagá	Florencia	Santa Fe	-28.03	-59.23	01/08/1983	28/02/2011
3284	Los Amores	Escuela 1256	Santa Fe	-28.23	-59.54	01/11/1984	31/01/2011
3232	Los Amores	Ruta Nac. 11	Santa Fe	-28.56	-59.36	01/01/1975	28/02/2011
3290	Las Garzas	Tres Bocas	Santa Fe	-28.69	-59.63	01/12/1984	31/01/2011
3269	El Rey	La Sarita	Santa Fe	-28.97	-59.85	01/01/1976	31/01/2011
3206	Golondrina	Fortín Olmos	Santa Fe	-29.07	-60.50	01/01/1973	31/01/2011
3302	Malabrigo	R. Prov. 42 S	Santa Fe	-29.13	-59.94	01/11/1984	28/02/2011
3224	Malabrigo	R. Prov. 88 S	Santa Fe	-29.36	-59.78	01/11/1982	28/02/2011
3202	El Toba	Margarita	Santa Fe	-29.73	-60.01	01/05/1976	31/01/2011
3323	Saladillo Dulce	C. Ariacaiquín	Santa Fe	-30.66	-60.23	01/01/1981	28/02/2011
3325	Saladillos	San Justo	Santa Fe	-30.78	-60.59	01/07/1981	28/02/2011
3328	San Javier	C Mascias	Santa Fe	-30.80	-60.01	01/10/1982	28/02/2011
3218	Saladillo Dulce	La Noria (RP81)	Santa Fe	-30.85	-60.28	01/06/1993	28/02/2011
3228	San Javier	Salad. Cabal	Santa Fe	-30.88	-60.03	01/01/1970	28/02/2011
3286	Colastiné	R. Prov. 50 S	Santa Fe	-31.95	-61.08	01/10/1984	28/02/2011
3318	Pavón	Cnel. Bogado	Santa Fe	-33.36	-60.58	01/02/1989	28/02/2011
4231	Grande	Pampichuela	Córdoba	-32.13	-64.82	01/10/1977	28/02/2011
4306	El Durazno	La Florida	Córdoba	-32.23	-64.78	01/01/1958	28/02/2011
4230	Grande	Lutti	Córdoba	-32.30	-64.73	01/03/1984	28/02/2011
4229	Grande	La Puente	Córdoba	-32.33	-64.78	01/01/1974	28/02/2011

Tabla 5. Estaciones con registros meteorológicos de la SSRH ⁽⁴⁾.

Código	3876	3328	3325	3005
Río	Guayquiraró	San Javier	Saladillos	Paraná
Lugar / Estación	Pueblo Libertador	Colonia Mascias	San Justo	Chapetón
Provincia	Corrientes	Santa Fe	Santa Fe	Entre Ríos
Latitud (°)	-30.22	-30.80	-30.78	-31.65

Longitud (°)	-59.39	-60.01	-60.59	-60.28
TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	01/09/1987	01/01/1982	23/02/1984	30/05/1979
	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011
TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	01/09/1987	01/01/1982	28/08/1981	30/05/1979
	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011
HUMEDAD (%)	01/04/1992	17/08/1990	14/05/1993	12/01/1979
	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011
VELOCIDAD VIENTO (km/h)	02/02/1993	01/01/1993	01/01/1993	02/01/1993
	31/05/2010	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011
HELIOFANÍA (hs)	02/01/1993	22/01/1993		01/01/1993
	30/04/2003	22/04/2003		08/06/2003
EVAPORACIÓN (mm)	01/01/1993	01/01/1993	01/01/1993	01/01/1993
	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011

(4) En cada variable se presenta inicio y fin de mediciones.

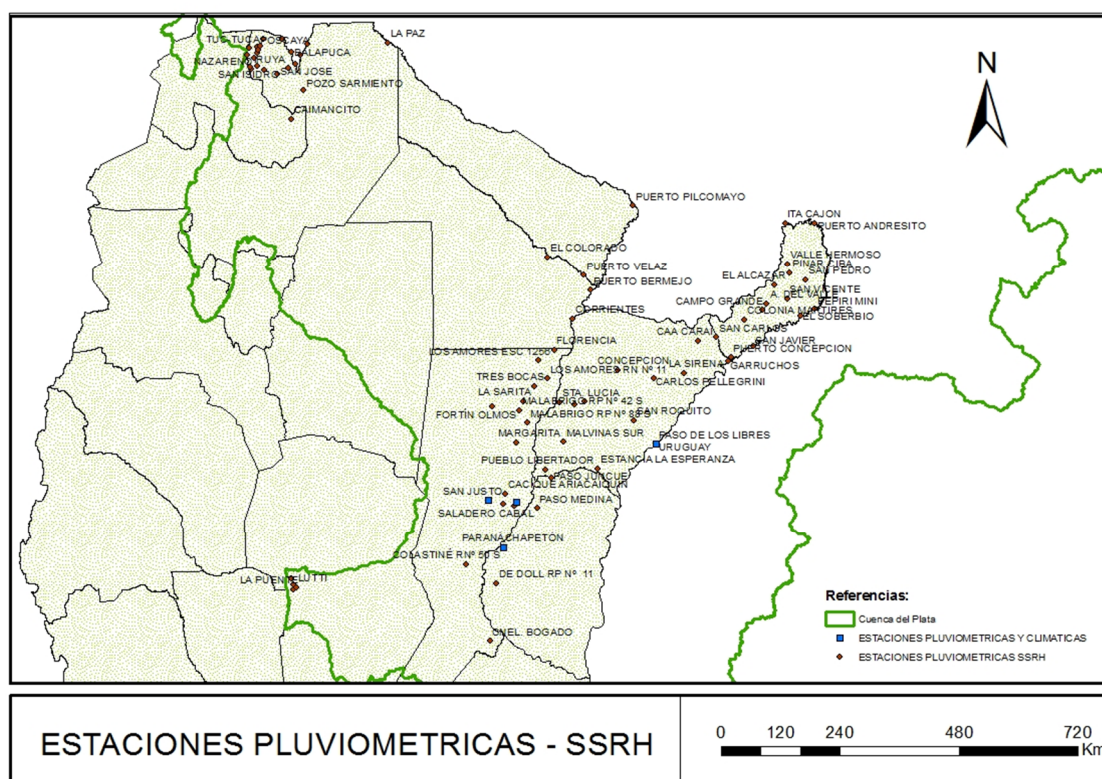


Figura 12. Localización de las estaciones pluviométricas de la SSRH.

Se presentan en la Figura 13 los meses con registros de precipitación mensual para las estaciones pertenecientes a la SSRH en el década del 70. Las restantes estaciones se encuentran en el Anexo I para la serie total correspondientes al período 1971-2010. En las mismas se aprecian las lagunas de información y sirven para seleccionar periodos comunes de información entre estaciones.

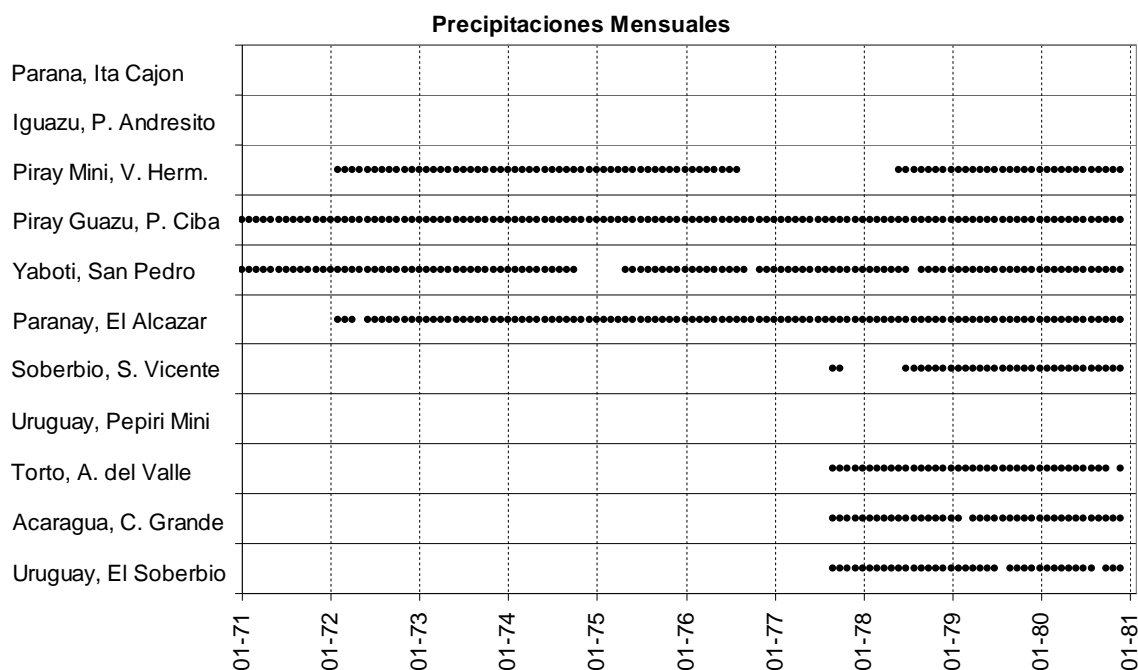


Figura 13. Precipitaciones mensuales existentes SSRH. Período Ene 1971 a Dic 1980.

2.3.2. SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

Del Servicio Meteorológico Nacional se obtuvo información de precipitación mensual y variables climáticas mensuales. En la Tabla 6 se observan referencias de las estaciones e inicio de datos disponibles. La Figura 14 muestra su ubicación. Las variables climáticas que se tienen son:

- Temperatura máxima mensual en °C
- Temperatura media mensual en °C
- Temperatura mínima mensual en °C
- Tensión de vapor en hPa
- Humedad relativa en %
- Heliofanía efectiva en hs
- Intensidad de viento a 10 m de altura en km/h

Tabla 6. Estaciones del SMN con registros de datos hidrometeorológicos.

Nº Inter.	Nombre Estación	Pcia	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura (m)	Inicio datos disponibles
87022	Tartagal Aero	Salta	-22.65	-63.82	450	1970
87016	Oran Aero	Salta	-23.15	-64.32	357	1970
87065	Rivadavia	Salta	-24.17	-62.90	205	1970
87047	Salta Aero	Salta	-24.85	-65.48	1221	1970
87007	La Quiaca Obs.	Jujuy	-22.10	-65.60	3459	1970
87046	Jujuy Aero	Jujuy	-24.38	-65.08	905	1970
87078	Las Lomitas	Formosa	-24.70	-60.58	130	1970
87162	Formosa Aero	Formosa	-26.20	-58.23	60	1970
87148	R Sáenz Peña	Chaco	-26.75	-60.40	93	1970
87155	Resistencia Aero	Chaco	-27.45	-59.05	52	1970
87129	Santiago del Estero	S. Estero	-27.77	-64.30	199	1970
87097	Iguazú Aero	Misiones	-25.73	-54.47	270	1970
87178	Posadas Aero	Misiones	-27.37	-55.97	125	1970
87166	Corrientes Aero	Corrientes	-27.45	-58.77	62	1970
87289	Paso de los Libres Aero	Corrientes	-29.68	-57.15	70	1970
87286	Curuzú Cuatiá Aero	Corrientes	-29.78	-57.98	75	1970
87393	Monte Caseros Aero	Corrientes	-30.27	-57.65	54	1970
87395	Concordia Aero	ER	-31.3	-58.02	38	1970
87374	Paraná Aero	ER	-31.78	-60.48	78	1970
87497	Guauguaychú Aero	ER	-33.00	-58.62	21	1970
87270	Reconquista Aero	Santa Fe	-29.18	-59.70	53	1970
87257	Ceres Aero	Santa Fe	-29.88	-61.95	88	1970
87371	Sauce Viejo Aero	Santa Fe	-31.7	-60.82	18	1970
87480	Rosario Aero	Santa Fe	-32.92	-60.78	25	1970
87349	Pilar Obs.	Córdoba	-31.67	-63.88	338	1970
87328	Villa Dolores Aero	Córdoba	-31.95	-65.13	569	1970
87467	Marcos Juárez Aero	Córdoba	-32.70	-62.15	114	1970
87453	Río Cuarto Aero	Córdoba	-33.12	-64.23	421	1970
87534	Laboulaye Aero	Córdoba	-34.13	-63.37	137	1970
87548	Junín Aero	Bs. As.	-34.55	-60.92	81	1970

Nº Inter.	Nombre Estación	Pcia	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura (m)	Inicio datos disponibles
87569	San Miguel	Bs. As.	-34.55	-58.73	26	1970
87582	Aeroparque Aero	Bs. As.	-34.57	-58.42	6	1970
87585	Buenos Aires	Bs. As.	-34.58	-58.48	25	1970
87571	El Palomar Aero	Bs. As.	-34.60	-58.60	12	1970
87574	Morón Aero	Bs. As.	-34.67	-58.63	24	1970
87576	Ezeiza Aero	Bs. As.	-34.82	-58.53	20	1970
87593	La Plata Aero	Bs. As.	-34.97	-57.90	23	1970
87596	Punta Indio B.A.	Bs. As.	-35.37	-57.28	22	1970
87550	Nueve de Julio	Bs. As.	-35.45	-60.88	76	1970
87544	Pehuajó Aero	Bs. As.	-35.87	-61.90	87	1970
87648	Dolores Aero	Bs. As.	-36.35	-57.73	9	1970
87645	Tandil Aero	Bs. As.	-37.23	-59.25	175	1970
87663	Villa Gesell Aero	Bs. As.	-37.23	-57.02	9	1976
87637	Coronel Suárez Aero	Bs. As.	-37.43	-61.88	233	1971
87685	Laprida	Bs. As.	-37.57	-60.77	212	1970
87649	Benito Juárez Aero	Bs. As.	-37.72	-59.78	207	1980

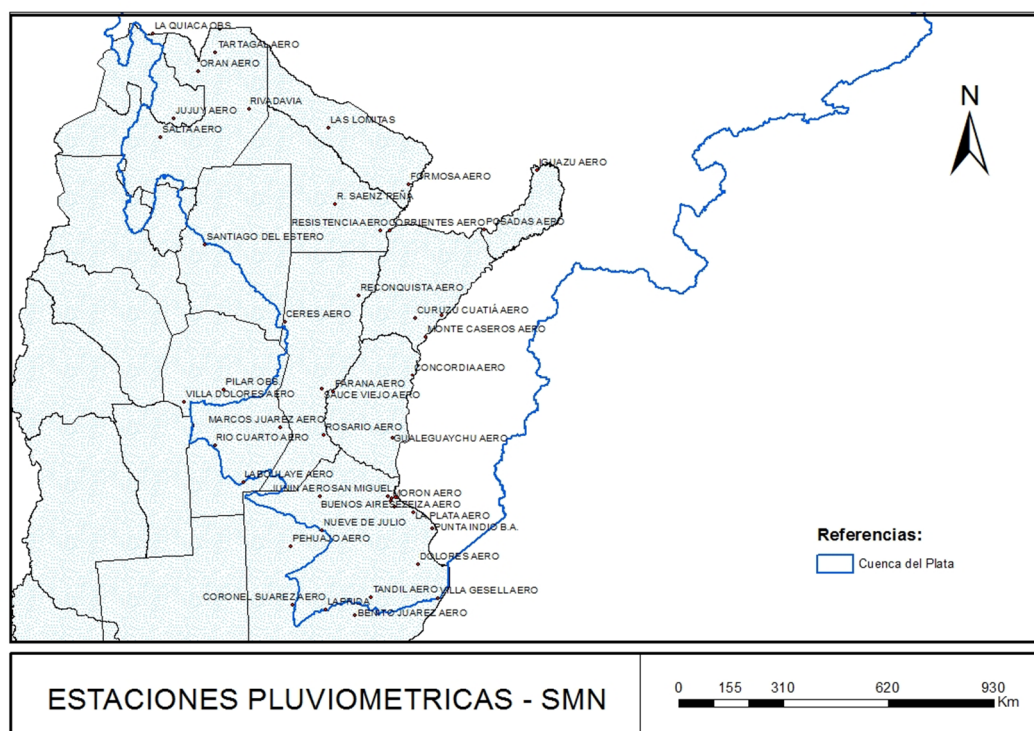


Figura 14. Localización de las estaciones del SMN.

Se realizaron los diagramas de disponibilidad de datos para la serie 1971-2010. La Figura 15 muestra a modo de ejemplo la representación para un conjunto de estaciones para el decenio 71-80. Las restantes figuras se presentan en el Anexo I.

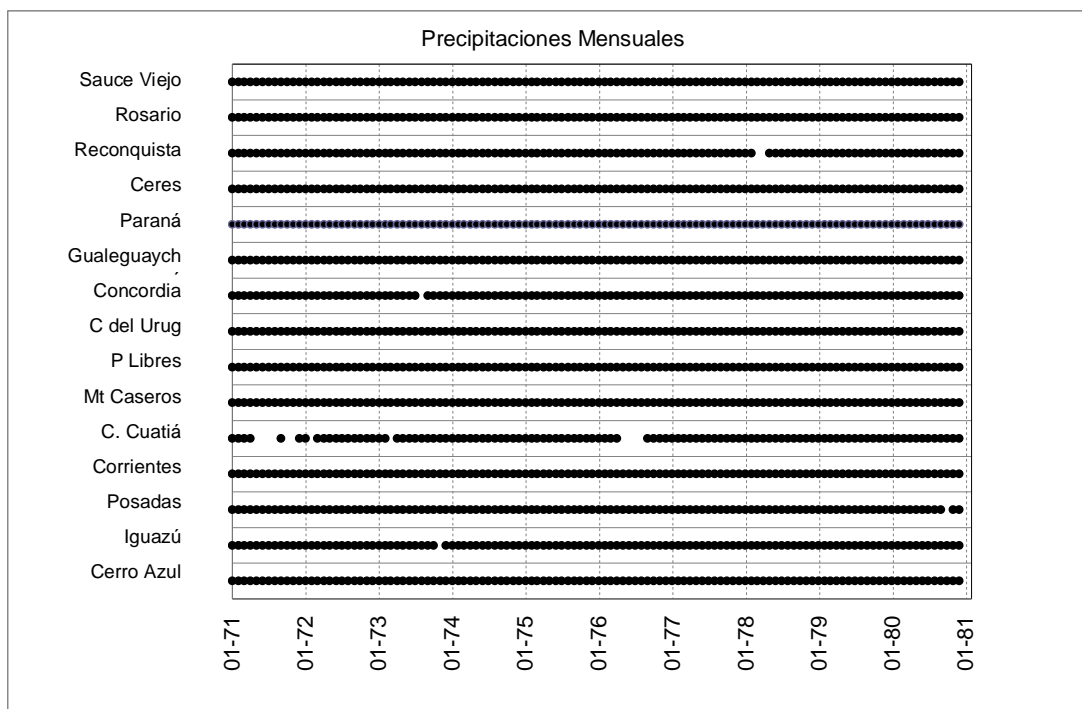


Figura 15. Precipitación mensual existente SMN. Período Ene 1971 a Dic 1980.

2.3.3. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

Las estaciones pertenecientes al INTA que se encuentran en Cuenca del Plata y proximidades, de las cuales se dispone de datos de precipitación y meteorológicos, se detallan en la Tabla 7 y se muestran en la Figura 16.

Tabla 7. Estaciones del INTA con registros de datos hidrometeorológicos.

Código	Nombre Estación	Provincia	Latitud (°)	Longitud (°)	Registros	
					Inicio	Fin
479	Salta Cerrillos INTA	Salta	-24.9	-65.48	1971	2011
464	El Colorado INTA	Chaco	-26.3	-59.37	1961	2013
415	R. Sáenz Peña INTA	Chaco	-26.87	-60.45	1961	2013
416	Las Breñas INTA	Chaco	-27.08	-61.12	1967	2013
487	Colonia Benítez INTA	Chaco	-27.42	-58.93	1968	2013
550	La María INTA	Sgo. Estero	-28.23	-64.15	1995	2008
423	Cerro Azul INTA	Misiones	-27.65	-55.43	1968	2012

Código	Nombre Estación	Provincia	Latitud	Longitud	Registros	
67	Bella Vista INTA	Corrientes	-28.43	-58.92	1961	2013
496	Concordia INTA	E Ríos	-31.36	-58.12	1969	2013
114	Paraná INTA	E Ríos	-31.83	-60.52	1961	2013
497	Conc. Uruguay INTA	E Ríos	-32.48	-58.23	1968	2013
437	Reconquista INTA	Santa Fe	-29.18	-59.7	1970	2012
98	Rafaela INTA	Santa Fe	-31.18	-61.55	1961	2012
472	Oliveros INTA	Santa Fe	-32.55	-60.85	1961	2013
438	Manfredi INTA	Córdoba	-31.82	-63.77	1969	2013
502	Marcos Juárez INTA	Córdoba	-32.68	-62.12	1967	2013
492	San Pedro INTA	Bs. As.	-33.68	-59.68	1967	2013
145	Pergamino INTA	Bs. As.	-33.93	-60.55	1961	2013
358	Castelar INTA	Bs. As.	-34.67	-58.65	1961	2013
38	Gral. Villegas INTA	Bs. As.	-34.92	-62.73	1973	2013
1798	Bragado INTA	Bs. As.	-35.11	-60.49	1965	2002
400	Balcarce INTA	Bs. As.	-37.75	-58.3	1961	2013



Figura 16. Localización de las estaciones del INTA.

Los datos meteorológicos que se disponen son:

- Temperatura máxima mensual en °C
- Temperatura media mensual en °C
- Temperatura mínima mensual en °C
- Tensión de vapor en mb
- Humedad relativa en %
- Heliofanía efectiva en hs
- Heliofanía relativa en %
- Intensidad de viento a 2 m de altura en km/h
- Intensidad de viento a 10 m de altura en km/h
- Radiación global en mj/m2
- Evapotranspiración potencial en mm

La Figura 17 muestra, a modo de ejemplo, los meses cuando existe información en el período 1971-1980, las restantes figuras, para la serie completa, se presentan en el Anexo I. Las estaciones se han agrupados representando cada figura una década.

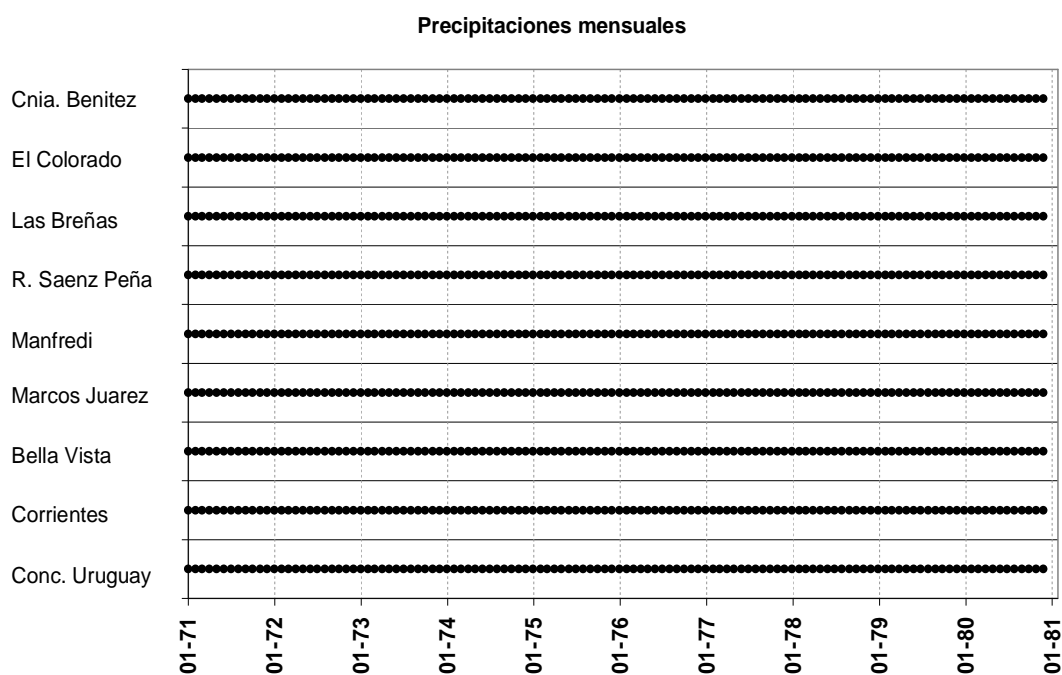


Figura 17. Precipitación mensual existente INTA. Período Ene 1971 a Dic 1980.

2.4. OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

2.4.1. INFORMACIÓN REFERIDA A LA TOPOGRAFÍA

Para la representación del terreno y el trazado de las cuencas y subcuencas se utilizaron:

- Curvas de nivel del SIG 250 del Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Base de datos del ATLAS 2010 de la SSRH
- Modelo de elevación digital del terreno del Proyecto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Esta información está disponible en las páginas Web de sus organismos, siendo de libre acceso.

El límite exterior de Cuenca del Plata fue suministrado por el Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático” del Comité Intergubernamental de Cuenca del Plata (CIC-Plata) y corresponde al límite que utilizan todos los subcomponentes del Programa.

2.4.2. DELIMITACIÓN DE CUENCAS Y SUBCUENCAS

La delimitación de las cuencas son las utilizadas para el Informe Final “Balance hídrico superficial de la Cuenca del Plata en territorio argentino”. Las mismas fueron obtenidas mediante el Modelo de Elevación Digital proveniente del Proyecto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), con una resolución espacial de 90 metros. Los mosaicos correspondientes a la zona de estudio fueron descargados en formato TIFF del sitio web de Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI).

La Figura 18 presenta el modelo digital de terreno (MDT) utilizado. Los límites fueron ajustados utilizando las curvas de nivel del SIG 250 del Instituto Geográfico Nacional (SSRH, 2002), disponible en su página Web, y contrastados con los publicados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en el Atlas 2010 (SSRH, 2010a).

Las cuencas resultantes se presentan en las Figuras 19 a 21. Es importante destacar que el trazado de las mismas requirió de valiosa información y que sólo fue posible mediante la coordinación entre la SSRH y las provincias que colaboraron con la información de base y tareas de campo. Así mismo la red de drenaje que se corresponde con el trazado de las subcuencas debió ser analizada en detalle.

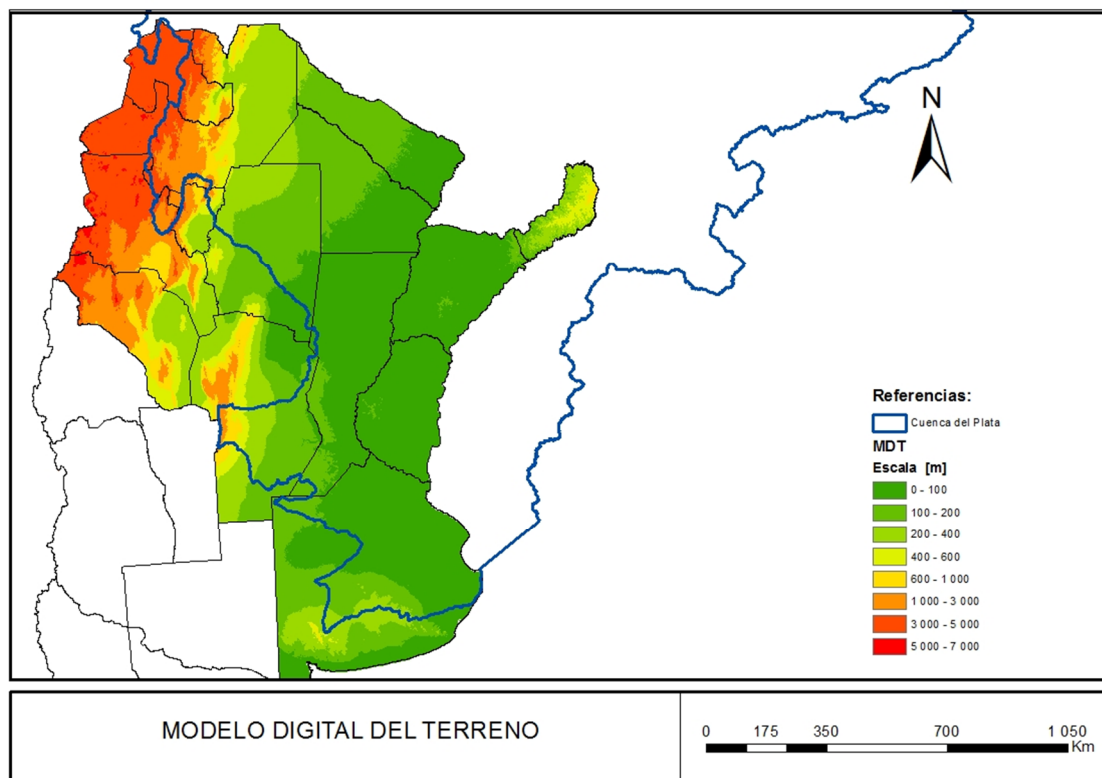


Figura 18. Modelo digital del terreno de la zona de estudio.

2.4.3. INFORMACIÓN DE SUELO

La información de suelo referida a tipo y textura, se presentan en las Figuras 22 y 23 respectivamente. La base de datos fue obtenida del Atlas de Suelos de la República Argentina del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1995).

De estos mapas se obtuvieron parámetros preliminares que requiere el modelo. En base a la textura del suelo en cada subcuenca se obtendrán los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para estimar la reserva de agua máxima utilizable. También a partir de esta información se infiere la infiltración máxima del suelo.

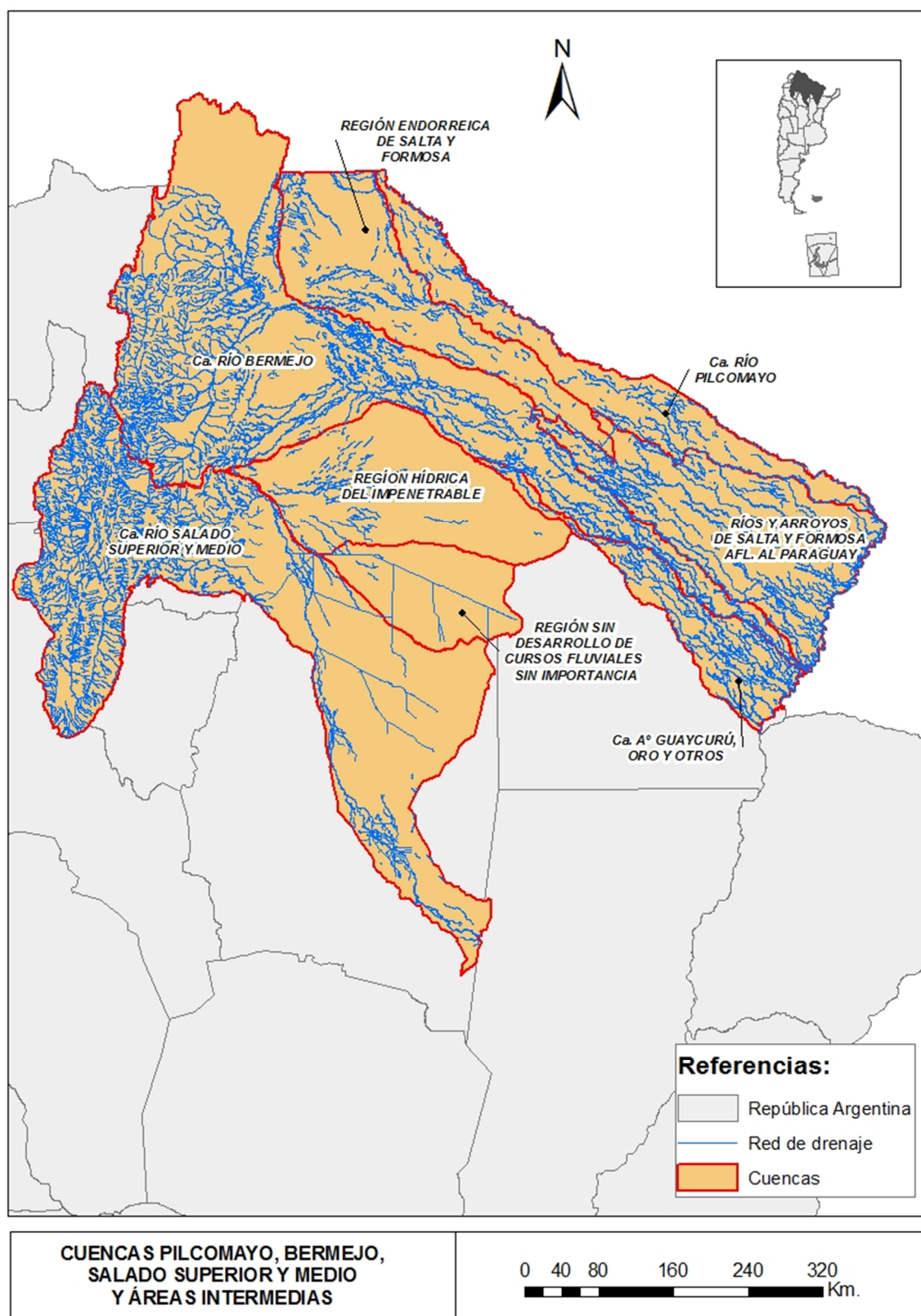


Figura 19. Cuencas del noroeste de Argentina y de aportes al río Paraguay.

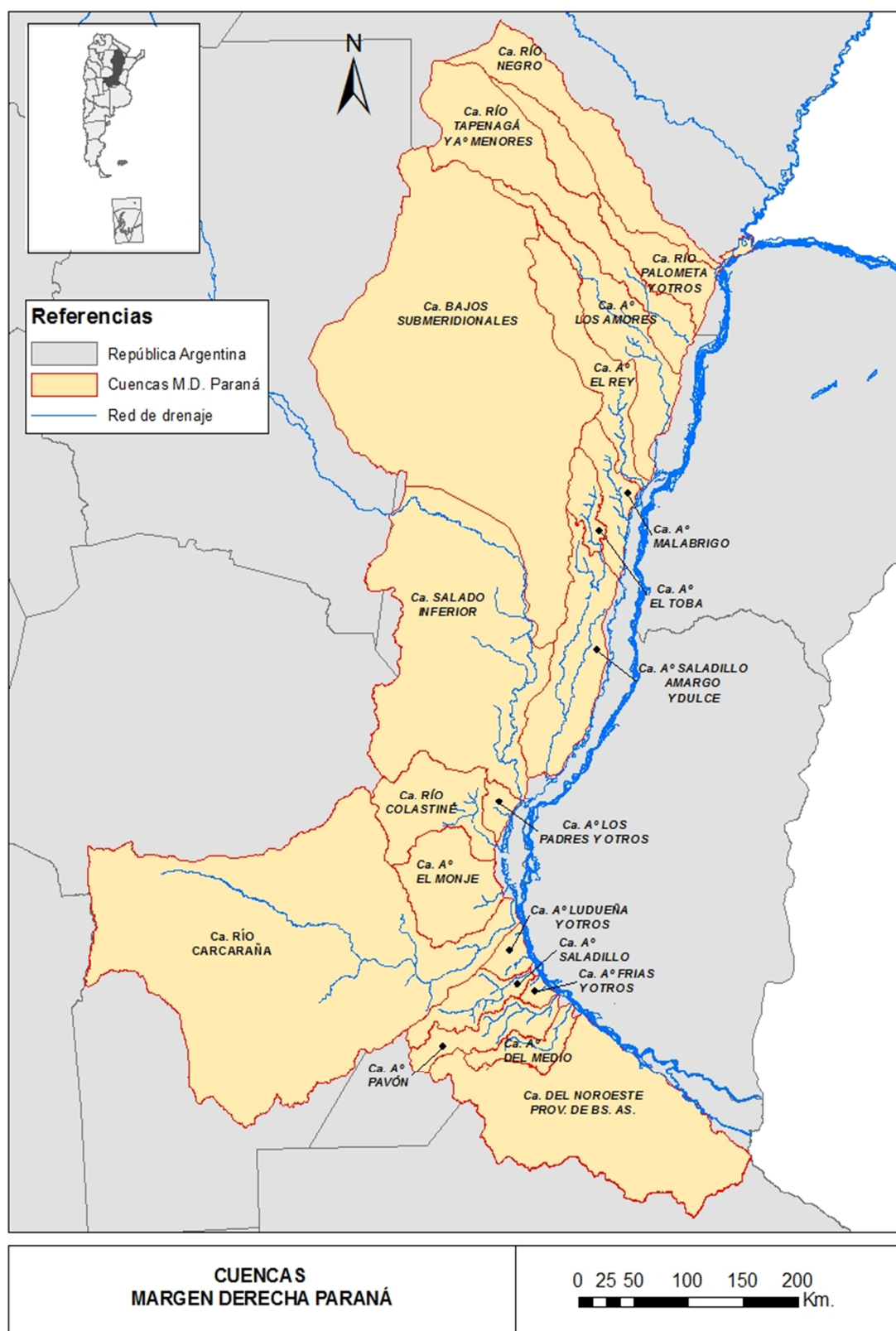


Figura 20. Cuencas margen derecha del río Paraná.

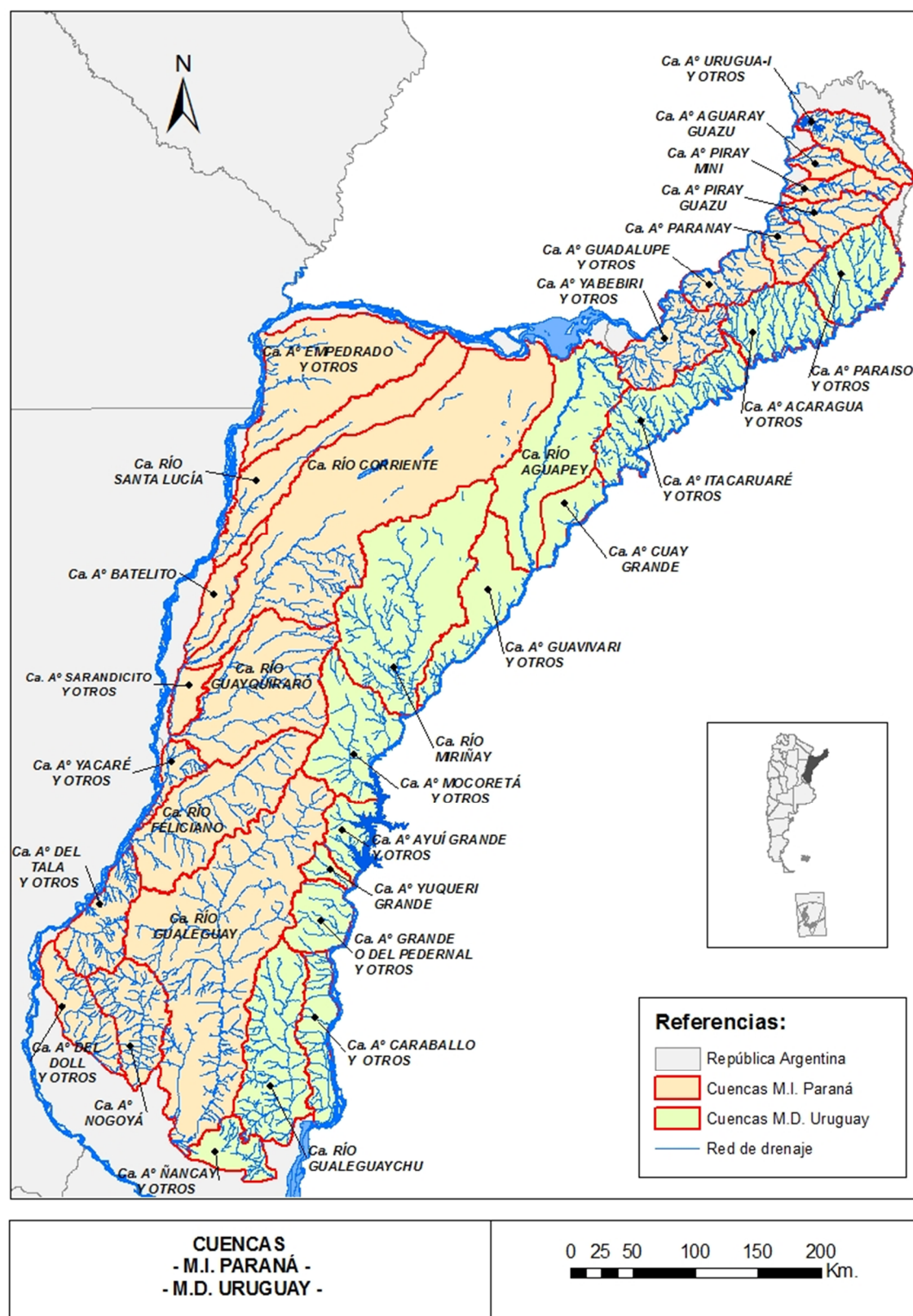


Figura 21. Cuencas margen izquierda del río Paraná y derecha del río Uruguay.

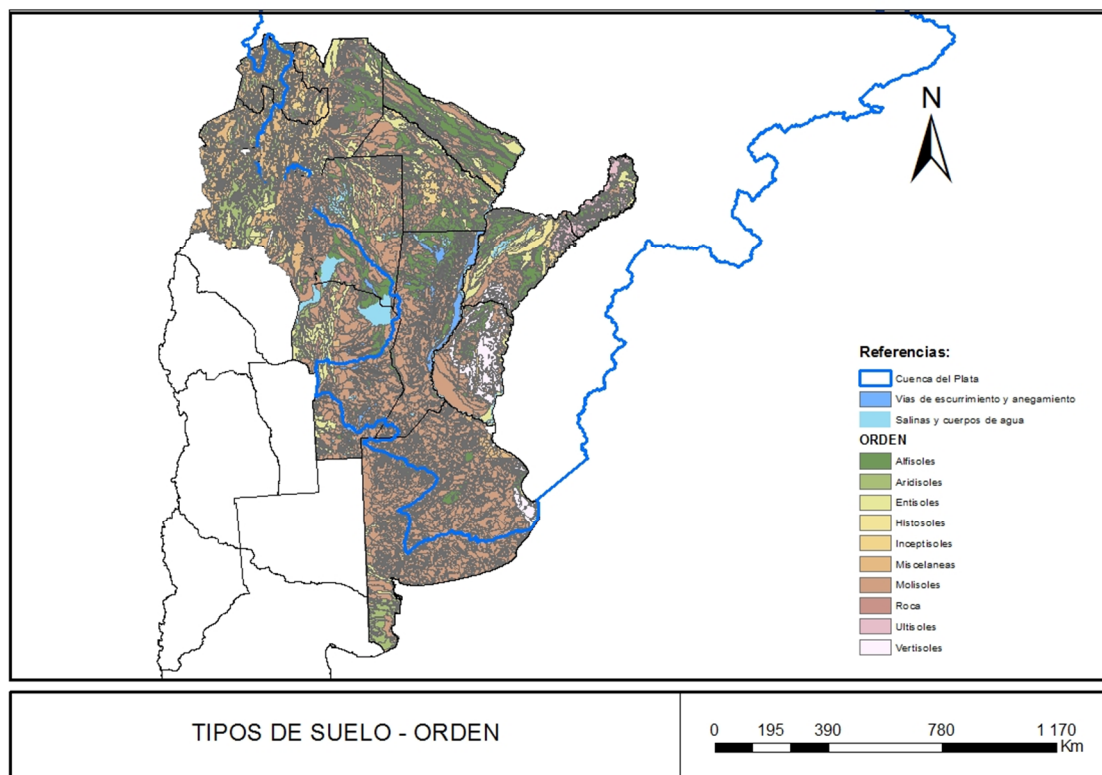


Figura 22. Tipo de suelo – orden.

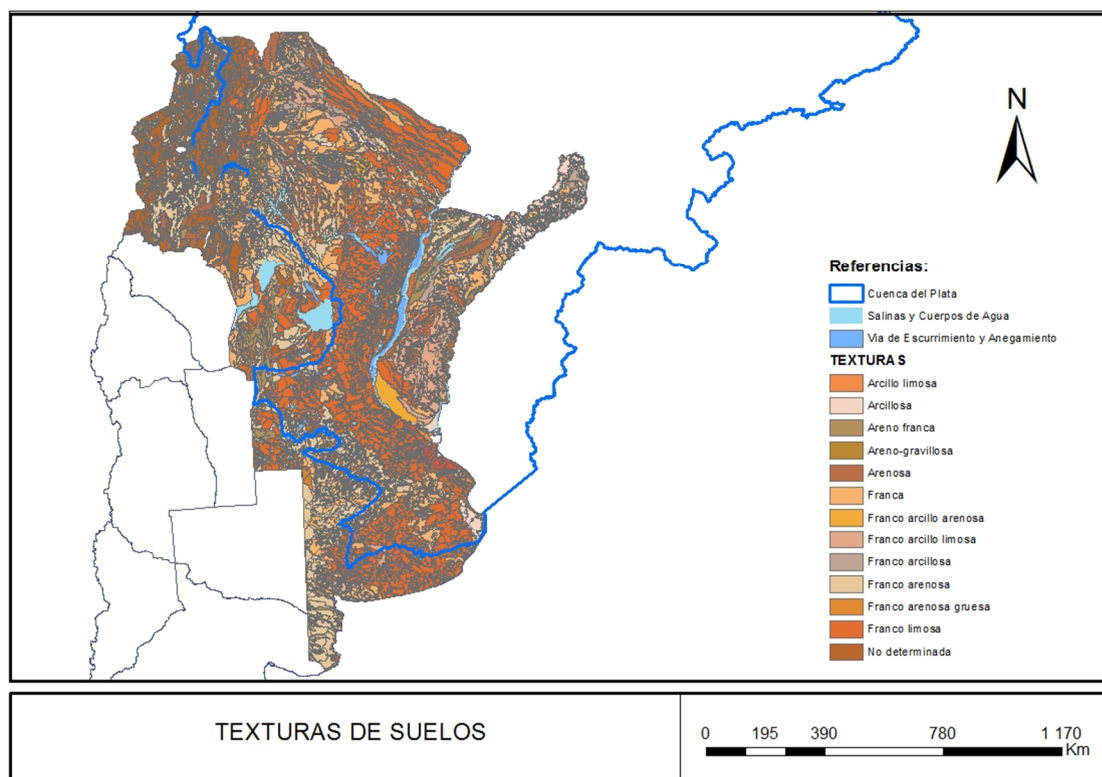


Figura 23. Textura de suelo superior.

3. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO PREVIO DE LOS DATOS

3.1. ANÁLISIS Y CONSISTENCIA DE INFORMACIÓN DE PRECIPITACIONES

A partir de la información disponible a paso de tiempo mensual, se realizó un análisis de datos faltantes, valores medios, máximos y mínimos. Se trabajó básicamente con series del SMN e INTA.

Teniendo en cuenta los períodos con disponibilidad de registros se utiliza el periodo 1971-2010. De esta manera se tiene una longitud de registros suficientemente larga para caracterizar las precipitaciones, contando a su vez con cuatro series decádicas coincidentes con las estadísticas elaboradas por el Servicio Meteorológico Nacional.

Las planillas con los datos de precipitación mensuales para la serie 1971-2010 y sus correspondientes valores promedios, máximos y mínimos mensuales y anuales se presentan en el Anexo I. Como ejemplo se incluye la Tabla 8 de la estación Resistencia Aero.

En trazo rojo se indica el mayor valor de precipitación mensual y anual de la serie, mientras en trazo azul se indica el menor valor de precipitación mensual y anual de la serie.

Muchas de las estaciones que se disponían se descartaron por alguno de estos motivos: series muy cortas, muchas lagunas o datos dudosos. En total se seleccionaron 89 estaciones de precipitación a ser utilizadas para la modelación, y consideradas distribuidas uniformemente en la zona de estudios.

El listado definitivo de las estaciones empleadas se presenta en la Tabla 9. Se aclara que si bien se requería que tuvieran al menos 25 años de datos completos, se aceptaron algunas estaciones que no tenían faltantes todo el año, sino algunos meses en varios años, con la finalidad de cubrir espacialmente la zona, tal es el caso de la estación Bragado que se mantuvo.

Tabla 8. Precipitaciones mensuales y anuales en (mm). Resistencia Aero. Serie 1971-2010.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL
1971	152.6	85.4	189.7	144.4	101.1	12.3	57.8	83.5	34	61.5	41.2	133.1	1097
1972	198.7	68.1	202.8	186.7	92	95.2	67.5	68.5	31.6	110.5	243.1	161.1	1526
1973	441.2	143.3	256.1	199.6	153	99.8	107.3	85.2	38.1	136.9	107.1	265.8	2033
1974	121.2	192	70.1	83.1	162.9	23.2	66.7	51.3	27.4	38.1	46.1	144.9	1027
1975	50.9	158.3	376.4	181.4	59.3	68	33.8	109	89	70.9	197.3	128.3	1523
1976	265.7	103.8	222.5	65	29.8	16.4	30.2	17.6	34.9	131.7	96.7	147.9	1162
1977	245.8	107.2	116.9	98.6	139.6	21.2	51.7	58.3	12.6	86.7	232.7	192.7	1364
1978	149.7	146	34.8	56.5	106.1	68.9	85.9	7.2	49.2	150.5	199.9	152.2	1207
1979	49.6	81.4	141.1	81.4	6.5	64.9	29.4	63.5	57.6	135.2	104.5	247.7	1063
1980	92.1	78.7	166.4	114.5	114.4	90.3	9.5	59.1	59.8	153.5	237.1	95.3	1271
1981	143.8	233.1	198.4	108.2	129	76	44.7	20	29.3	106.6	171.4	57.1	1318
1982	81.8	137.8	71.6	82.6	94.8	269.1	21.9	126.4	167.4	29.4	412	142	1637
1983	295.6	142	165.5	421.5	203.6	6.8	75.1	1.8	0	69.9	80.4	44.1	1506
1984	248.1	176.6	283.2	142.3	176.2	109.9	7.5	11.1	81	134.9	138.6	50	1559
1985	72.1	276.3	235.2	371.3	108.8	38.7	65.1	51.7	107.9	50.3	19.8	82.8	1480
1986	72.5	121.7	484.8	511.5	123.5	165.8	45.5	29.3	176.1	180.7	221.4	93.1	2226

1987	176.6	268.6	58.2	242.3	65.5	47.4	133.1	41.2	27.3	55.6	201.8	129	1447
1988	189.3	75.2	93.4	148.1	4.6	40.6	2.8	44.9	66.8	119.2	92.5	64.2	942
1989	69.7	108	273.5	293	3.6	50.3	70.2	98.9	106.7	131.5	118	195.1	1519
1990	130.2	172.8	135.9	527.8	59.9	70.6	7	69.4	50.8	359.3	124.7	224.2	1933
1991	121.7	166.5	24.4	174.7	247.8	38	17.5	12	55.7	74.4	179.5	208.4	1321
1992	107.5	112.5	119.6	186.9	27.1	99.3	42	53.5	69.1	234.2	119.2	168.5	1339
1993	237.5	14.2	177.2	63.9	43.1	59.1	17.1	19.7	60.4	109.4	280.9	43.9	1126
1994	194.8	159.7	362.1	121.4	133.9	92.9	31.8	56.9	59.6	157.2	205.2	103.8	1679
1995	234.2	308.5	233	56.7	79.5	6.2	31.8	31.6	15.5	64.3	79.5	65.7	1207
1996	257.7	327.2	142.4	412.4	14.6	5.1	0.4	47.6	112.2	198.3	179	326.6	2024
1997	164	475.7	11.5	69.8	85.1	21.4	26.5	23.1	42.8	232	277	220.2	1649
1998	233.1	310.3	211.2	401.9	40.5	61.5	6.6	43.8	33	76.3	160.9	175.7	1755
1999	132	153.1	296.7	106.5	107.3	34.8	38.5	0.4	18.2	66	80.4	77	1111
2000	241.6	237.5	143.5	128.5	93.2	59.4	5.3	42.5	26.5	213.2	166.5	308.5	1666
2001	182.2	48.1	174.3	154.1	10.3	177.2	26	45.5	69.6	156	198	55	1296
2002	273.7	122.2	382.8	364.6	88.6	44.9	86.7	32	65.4	154.4	175.7	267.9	2059
2003	69.7	107	117.4	114.2	2.4	11.4	5.7	63.1	25.8	134.9	165.3	285.2	1102
2004	35.8	44.6	81	168.4	1.6	61.4	21.4	22	136.3	196.3	200.2	146.3	1115
2005	69.3	85.9	147	347	91.7	69.3	3.4	18.9	48.5	66.8	189.5	95.5	1233
2006	116.7	61.7	175.4	101.2	32	71.6	0.1	12.4	21.8	204	57.4	138.9	993
2007	159.3	155.2	217.4	120.7	10.2	4.9	3.2	6.5	141.3	216.2	40.6	166.2	1242

2008	64.3	79.7	43.7	36.8	10.4	98.6	2.3	33.1	88	169.8	57	92	776
2009	159	163.8	34.2	53.2	58.8	14.3	42.7	25.3	19.9	39.2	613	163	1386
2010	300.4	123.5	136	58.3	205.8	7.6	37	54	108	44.7	41.7	181.3	1298
MEDIA	165.0	153.3	175.2	182.5	83.0	61.9	36.5	43.5	61.6	128.0	163.8	151.0	1405
MAXIMO	441.2	475.7	484.8	527.8	247.8	269.1	133.1	126.4	176.1	359.3	613	326.6	2226
MINIMO	35.8	14.2	11.5	36.8	1.6	4.9	0.1	0.4	0	29.4	19.8	43.9	776

Tabla 9. Precipitaciones medias anuales y mensuales (mm). Serie 1971-2010.

Nombre Estación	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Iguazú Aero	157.1	221.8	176.8	164.6	178.4	147.3	127.7	156.9	180.4	150.5	111.1	110.7	1883.2
Posadas Aero	141.9	211.2	171.1	173.8	164.5	149.6	141.8	172.8	134.9	139.5	100.5	100.7	1802.3
Cerro Azul Inta	158.4	224.6	165.4	181.0	178.6	178.0	157.2	197.0	158.9	148.8	113.7	120.0	1981.5
Corrientes Aero	70.2	141.7	172.9	155.6	169.7	146.9	171.6	187.9	91.1	67.5	41.8	51.0	1468.0
Cnia Benítez Inta	64.5	136.9	169.0	146.0	167.3	142.1	162.2	165.7	76.3	56.3	30.6	44.9	1361.7
R S Peña Inta	35.9	92.5	125.0	131.4	139.3	112.4	139.0	125.7	47.9	23.3	17.8	20.6	1010.8
Las Breñas Inta	35.4	81.7	126.0	127.2	147.0	130.0	142.7	118.3	37.3	25.2	14.2	15.5	1000.5
Resistencia A	65.5	131.4	164.7	149.0	165.0	153.3	175.2	182.5	83.0	61.9	36.5	43.5	1411.5
Bella Vista Inta	69.0	139.1	153.2	140.4	141.5	154.8	159.7	165.5	71.5	53.0	39.3	38.7	1325.9
Reconquista Inta	58.4	125.5	150.9	137.1	135.9	164.4	168.1	157.3	58.1	46.8	29.2	28.5	1260.1
P Libres Aero	110.2	158.4	146.6	122.0	142.4	159.2	155.3	187.7	125.7	97.2	85.0	70.9	1560.5
Curuzú Cuatia A.	97.1	141.5	134.3	120.3	125.3	145.5	151.0	175.1	93.6	76.4	68.6	46.1	1374.9

Nombre Estación	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Montecaseros A.	100.2	147.0	146.8	134.3	153.9	159.6	148.8	171.8	105.9	85.3	74.4	65.8	1493.8
Ceres Aero	42.8	81.1	103.9	139.9	135.5	123.8	156.4	97.8	34.4	21.5	14.4	14.8	966.2
Rafaela Inta	47.7	85.3	115.6	136.0	124.5	130.5	160.6	106.6	46.7	30.4	19.6	20.5	1023.9
Sauce Viejo Aero	57.9	106.7	127.9	119.1	107.9	115.4	151.7	112.2	46.6	34.0	25.4	31.3	1036.1
Paraná Inta	65.6	116.7	117.8	134.8	117.3	126.7	156.8	117.5	53.1	38.8	29.5	35.5	1110.3
Concordia Inta	94.7	119.6	142.6	129.3	131.6	133.0	143.7	139.7	99.4	76.1	56.1	55.1	1321.0
C del Uruguay In.	75.3	119.1	110.6	120.6	112.4	118.2	137.2	123.7	82.7	64.8	54.8	49.1	1168.4
Guauguaychú A.	76.0	112.0	115.0	113.9	121.8	124.0	130.9	106.3	77.6	58.3	53.5	53.5	1142.9
Oliveros Inta	55.8	108.8	106.6	140.6	119.4	125.7	138.0	92.4	53.7	30.9	27.8	31.2	1030.9
Rosario Aero	56.4	107.3	107.3	123.1	111.2	127.5	145.9	97.7	54.2	34.1	29.6	36.1	1030.5
Marcos Juárez In.	47.1	94.7	102.4	136.7	116.2	113.0	112.6	80.4	35.7	22.7	22.2	19.8	903.4
Laboulaye Aero	46.4	86.6	106.4	123.5	118.3	115.7	136.1	79.1	33.1	15.4	17.2	20.4	898.2
San Pedro Inta	62.5	114.6	111.5	111.0	120.7	124.1	129.8	91.7	61.5	48.0	43.9	38.9	1058.2
Pergamino Inta	53.0	125.6	103.0	108.1	124.7	119.9	132.3	107.2	49.6	33.2	33.1	32.5	1022.2
Junín Aero	52.2	115.9	105.0	107.1	139.2	117.6	144.0	100.3	55.9	30.7	34.0	35.1	1037.1
Gral Villegas Inta	47.0	94.3	97.6	122.8	131.4	88.2	121.0	65.1	31.2	21.9	18.4	20.5	859.3
Bragado Inta	52.0	113.1	109.7	110.9	127.2	117.9	116.2	102.0	63.9	52.8	41.5	44.6	1051.9
Nueve de Julio A.	62.5	108.4	102.3	108.2	137.7	117.3	147.2	109.3	56.7	39.7	42.5	36.2	1067.8
Pehuajo Aero	59.8	116.4	101.4	106.1	120.6	104.5	147.0	82.5	47.7	27.8	23.6	29.8	967.2
San Miguel Aero	67.8	125.1	114.3	108.3	122.7	133.2	124.7	103.9	78.8	60.6	63.7	65.4	1168.7

Nombre Estación	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Aeroparque Aero	63.9	108.4	102.8	99.5	119.1	111.5	123.4	95.1	78.5	54.2	59.1	61.4	1077.0
Castelar Inta	60.2	114.0	96.9	102.9	114.7	114.3	114.3	91.9	70.8	50.7	53.2	55.0	1038.8
Ezeiza Aero	59.6	108.2	95.8	94.1	102.8	109.8	110.5	89.1	71.8	52.5	54.1	56.9	1005.0
La Plata Aero	69.4	111.5	96.6	89.3	109.0	115.1	118.7	81.3	79.3	58.0	63.7	62.0	1053.9
Punta Indio Aero	67.4	93.9	98.5	78.5	89.9	107.3	102.1	89.6	65.4	61.4	65.9	67.6	987.4
Dolores Aero	60.1	96.3	99.2	90.0	112.0	95.9	90.5	89.9	60.5	55.1	58.8	56.7	965.1
Coronel Suárez Aero	55.4	98.1	75.7	90.6	102.1	87.1	97.2	73.6	45.8	25.3	25.2	29.9	806.1
Laprida Aero	62.3	100.4	78.1	96.6	92.7	89.3	92.9	76.3	52.2	34.6	33.6	35.6	844.6
Tandil Aero	60.0	99.4	87.3	84.8	109.0	91.5	101.5	80.6	61.0	41.9	43.1	42.2	902.2
Benito Juárez A.	67.1	98.1	98.2	100.5	93.6	66.9	97.9	75.6	62.7	40.5	39.8	41.9	882.8
Balcarce Inta	59.5	95.8	85.4	105.5	104.2	87.3	87.6	81.8	61.6	50.5	51.6	47.0	917.8
Puerto Bermejo	62.3	144.7	148.9	113.1	134.2	117.4	144.3	176.0	70.0	58.1	47.5	39.8	1256.4
Paraná, Chapetón	56.6	120.3	119.8	128.4	112.8	132.6	158.4	117.8	61.0	39.3	26.1	32.1	1105.3
El Toba, Margar.	64.2	113.0	121.5	132.1	142.5	152.5	137.0	137.3	57.9	38.6	23.0	22.7	1142.4
Fortín Olmos	43.4	90.7	133.9	119.3	153.0	153.3	143.5	136.7	49.1	34.2	23.1	29.4	1109.7
Malabrigo, RP88	64.5	129.1	139.0	143.2	129.8	155.0	159.2	160.8	52.2	51.0	31.8	33.6	1249.0
Saladero Cabal	67.9	94.5	110.9	120.3	127.8	140.1	144.1	140.8	65.3	46.3	30.9	35.3	1124.1
Los Amores, RN11	69.3	142.7	159.3	136.6	156.7	163.8	150.4	188.9	68.0	52.7	30.2	29.1	1347.7
El Rey, La Sarita	59.7	106.7	146.4	131.7	148.5	170.8	162.1	157.3	57.3	44.3	29.8	25.4	1240.1
Colastiné, RP50	53.4	109.8	106.6	126.1	126.4	100.4	147.7	91.7	47.0	32.2	26.0	31.3	998.5

Nombre Estación	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Las Garzas, Tres Bocas	61.3	113.9	138.3	152.5	142.3	154.7	186.1	169.5	59.1	47.7	31.5	25.2	1282.2
Malabrigo, RP42	55.7	123.8	142.8	124.4	145.2	157.0	172.3	158.1	51.5	42.6	35.2	22.8	1231.6
Pavón, Cnel Bogado	44.6	101.6	104.2	112.1	100.2	116.1	113.9	80.0	57.9	36.1	27.4	38.5	932.6
Cacique Araicaquin	49.3	116.4	103.6	131.1	133.0	130.0	133.9	135.2	56.9	41.2	27.9	38.2	1096.6
San Justo	52.1	81.0	102.7	117.1	123.8	145.0	149.6	125.5	55.9	34.6	24.7	23.0	1035.0
Colonia Mascias	57.4	111.8	107.1	130.8	127.5	123.9	144.7	145.2	59.3	51.9	30.5	32.8	1122.7
Florencia	68.4	128.9	138.7	151.6	160.7	164.4	175.0	179.7	68.2	50.1	29.4	35.9	1351.1
Pinar Ciba	148.7	223.2	160.3	171.5	158.1	148.1	137.4	168.5	165.9	144.1	100.6	116.6	1843.0
Colonia Mártires	164.6	232.6	182.6	163.1	167.5	160.8	160.0	202.3	154.5	141.1	112.9	116.0	1958.0
Valle Hermoso	155.6	216.6	145.2	158.1	158.0	156.6	139.5	160.8	154.3	143.8	97.8	120.8	1807.1
Campo Grande	155.7	229.9	180.1	161.4	170.8	150.4	127.6	181.5	151.6	151.9	119.0	109.7	1889.5
El Alcázar	155.0	218.9	177.8	154.9	167.2	144.6	159.2	168.4	152.2	157.4	114.1	124.9	1894.4
San Pedro	177.8	250.6	181.5	174.4	164.7	172.9	141.5	186.3	178.6	179.0	120.5	149.6	2077.3
Torto, A del Valle	178.5	218.7	175.0	161.2	178.3	151.9	149.3	176.3	159.3	162.3	125.1	123.5	1959.4
San Vicente	155.9	229.1	173.1	147.2	165.8	149.1	130.0	184.2	173.8	156.1	139.6	109.5	1913.3
El Soberbio	157.7	239.1	158.8	150.2	151.8	152.6	157.2	159.2	152.7	146.1	129.5	107.8	1862.6
Pepiri Mini	146.1	221.9	143.9	147.8	139.0	154.8	127.0	152.8	151.8	146.6	126.9	122.4	1780.9
Puerto Andresito	150.9	193.4	168.9	145.5	178.7	153.2	114.2	144.7	190.9	139.9	96.4	109.6	1786.3
Ita Cajón	121.0	195.7	154.4	133.8	137.9	130.1	108.2	132.2	172.3	114.9	71.9	84.0	1556.3
Paso Juncué	63.9	120.9	139.3	133.4	147.8	143.0	163.9	164.8	81.1	46.4	30.9	38.9	1274.3

Nombre Estación	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
La Sirena	129.8	180.2	154.8	128.3	148.6	142.5	150.4	217.1	146.4	113.4	105.7	104.6	1721.8
Carlos Pellegrini	83.1	150.9	144.6	126.2	114.3	131.0	133.6	162.3	87.8	90.4	75.8	55.5	1355.6
San Roquito	85.4	126.1	134.6	106.7	110.1	135.1	151.2	157.8	87.7	73.6	55.0	46.8	1269.9
Santa Lucía	63.9	111.9	124.1	114.8	124.0	121.9	142.2	141.8	57.8	45.6	31.9	33.5	1113.3
Batel-Batelito, Concepción	84.0	165.7	157.1	113.0	124.0	175.0	157.0	199.9	91.3	101.3	65.7	61.6	1495.5
Paso Cerrito	63.5	113.1	143.5	113.4	126.0	139.7	135.1	162.1	81.9	72.8	43.8	47.1	1241.8
Garruchos	148.4	214.1	146.2	121.9	147.3	132.9	138.4	193.8	110.8	123.8	120.7	87.6	1686.0
Caa Carai	114.8	180.5	125.0	126.3	117.5	125.3	140.0	156.1	108.7	104.9	93.2	76.4	1468.5
San Carlos	143.0	221.7	159.0	159.7	149.3	158.9	125.2	188.6	126.2	122.8	93.0	87.8	1735.1
Corrientes, Chavarría	66.3	131.2	157.8	133.6	130.8	143.6	120.8	163.8	92.4	56.2	48.0	40.7	1285.3
Pueblo Libertador	58.1	131.2	129.2	141.8	147.1	131.8	156.4	160.3	71.6	42.0	33.7	34.6	1238.0
Estancia La Esperanza	74.6	131.8	122.7	131.4	128.2	141.1	153.8	160.0	82.9	80.0	46.5	42.8	1295.9
Malvinas Sur	60.0	114.6	113.1	114.5	122.3	122.5	143.8	152.4	69.7	59.4	36.9	37.5	1146.6
Rivadavia	13.8	47.5	74.7	120.4	124.1	91.8	87.6	51.2	17.3	7.5	1.9	4.5	642
Las Lomitas	30	65.6	117.2	136.5	131.8	113	149.5	84.1	52.2	20.9	12.2	17.7	933.7
Campo Gallo	15.7	40.6	83.2	111.7	135.0	98.7	107.3	57.6	16.9	8.2	2.9	2.9	681
El Colorado	52.6	114.4	150.2	145.7	123.5	125.2	138.1	134.1	84.3	40.8	29.1	28.6	1167

3.1.1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE PRECIPITACIONES ANUALES

En primer lugar se analiza en cada estación la precipitación anual cronológica incremental, la cual es de utilidad para el análisis de tendencias.

En el Anexo I se encuentran las figuras que muestran para el período 1971-2010, el promedio de la serie, los valores anuales y las medias cronológicas incrementales. A modo de ejemplo se adjunta la figura correspondiente a la estación Resistencia Aero en Chaco (Figura 24).

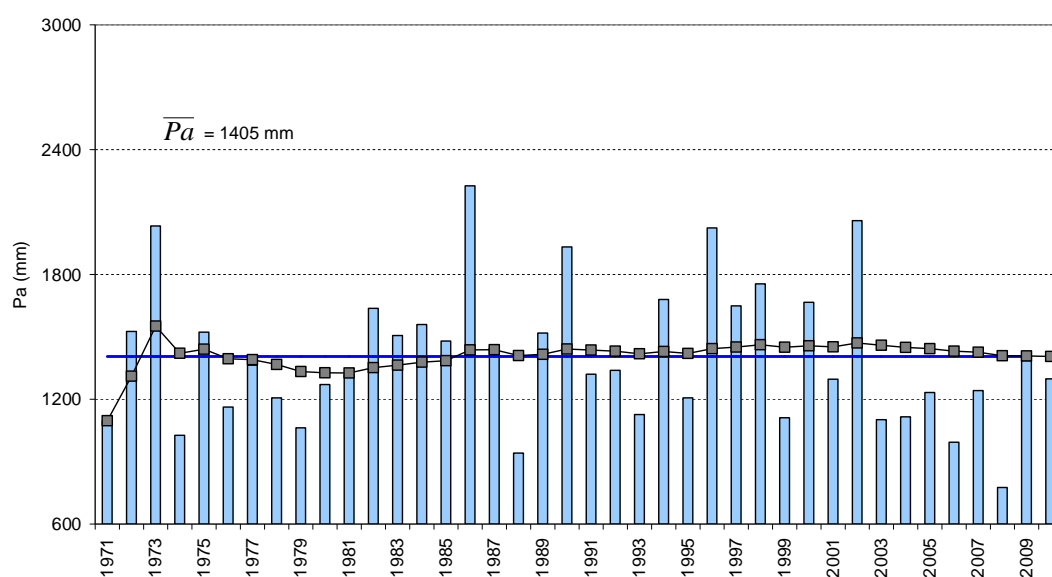


Figura 24. Precipitación anual y medias cronológicas incrementales. Resistencia Aero. Serie 1971-2010.

A partir de la precipitación media anual se ha realizado el trazado de isohietas anuales en mm, para el período 1971-2010 que se presenta en la Figura 25.

De las series y figuras analizadas se observa la característica general que presenta el régimen de precipitaciones anuales en la región que es la tendencia a agrupar años húmedos (por encima de la media), años secos (por debajo de la media) en períodos de entre 3 a 5 años e intercalarse con otros períodos de alternancia (por encima y por debajo de la media). Claramente estos agrupamientos no son homogéneos para toda la región, pero si se encuentra correspondencia entre las estaciones más próximas.

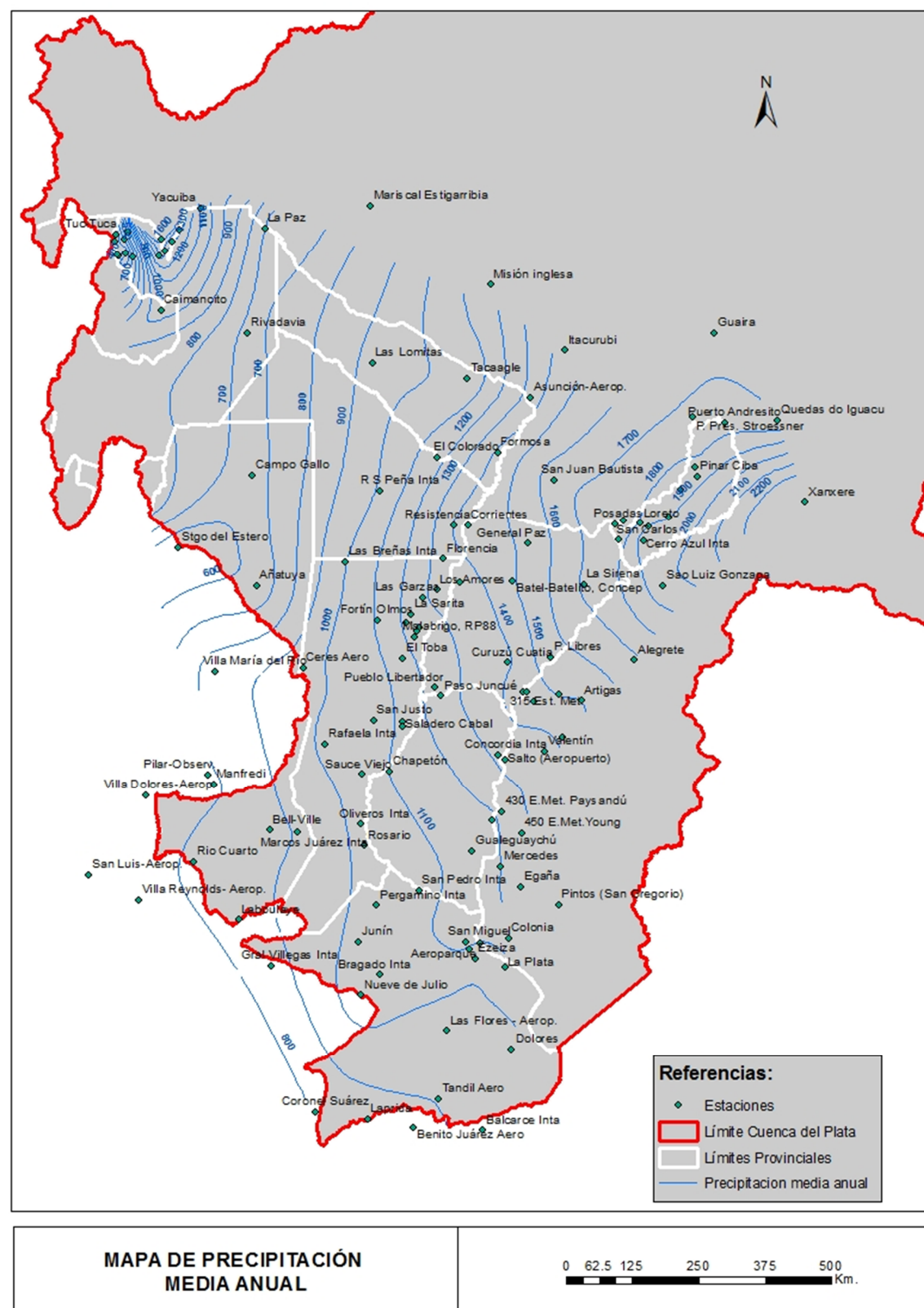


Figura 25. Isohietas anuales zona de estudio.

En cuanto a la posible tendencia de aumento o disminución de los montos anuales de lluvia, en general se presenta en la mayor parte de la región una tendencia al aumento de precipitación

anual desde los años 70 u 80 hasta el 2000 y luego una leve tendencia a la disminución hacia el año 2010. Debe quedar claro que el análisis es exclusivamente referido al período 1971 – 2010 y no hace ninguna comparación con períodos anteriores.

La tendencia general expresada se manifiesta con variada intensidad según las subregiones que se consideren.

En el extremo noreste (Prov de Misiones), se denota el crecimiento leve desde los años 80 hasta el 2000, a partir del cual se mantiene estable, mientras que las zonas este del Chaco, norte de Santa Fe y en Corrientes el decrecimiento es más marcado a partir del año 2002.

En la parte centro y sur de Santa Fe y sur de Entre Ríos, no se manifiesta esta declinación en los últimos 10 años, justamente porque se presenta un agrupamiento manifiesto de años húmedos entre el 2000 y 2003 y el año 2007.

En la zona centro-oeste de la región se manifiesta una leve tendencia a la disminución de la precipitación anual de los 80 a la actualidad.

3.1.2. DISTRIBUCIÓN EN EL AÑO DE PRECIPITACIONES MENSUALES

Se analiza a partir de considerar los valores de precipitación promedio de cada mes para toda la serie disponible, 1971 – 2010, y su graficación, que se acompaña en el Anexo I. A modo de ejemplo se adjunta la figura correspondiente a la estación Resistencia Aero en Chaco (Figura 26).

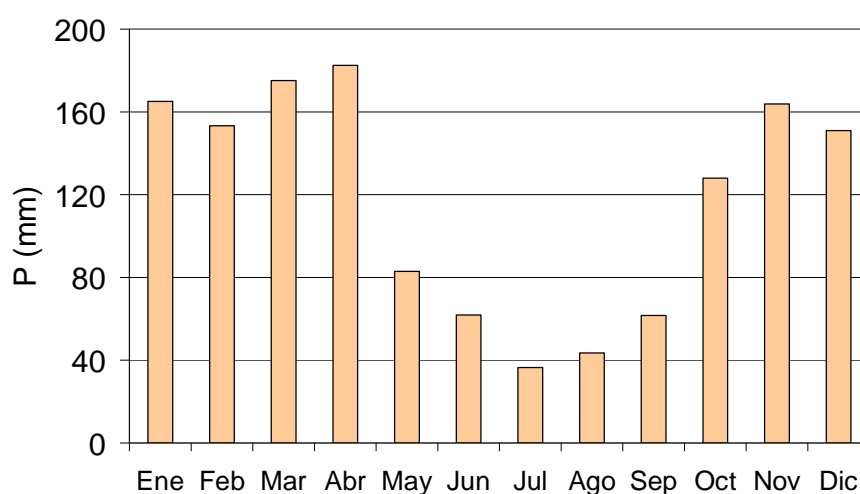


Figura 26. Precipitación media mensual. Resistencia Aero. Serie 1971-2000.

La tendencia general en toda la región indica un ciclo unimodal, con mínimos en invierno y máximos en verano-otoño, no homogéneo sobre todo desde el punto de vista de la disminución invernal de las lluvias. En el extremo nordeste de la región esta disminución invernal es poco marcada y se va acentuando hacia el oeste, siendo muy marcada en las estaciones de Córdoba y Santiago del Estero.

Sin embargo esta distribución a lo largo del año en valores medios, no tiene más valor que una síntesis estadística, puesto que a nivel de años reales, la variabilidad de las precipitaciones mensuales es muy grande con valores que pueden ser 10 veces más grandes o más chicos que el valor medio.

Asimismo es frecuente observar el fenómeno de persistencia por el cual se dan sucesión de 2, 3 o más meses seguidos de situaciones tanto de excesos como de déficit.

3.1.3. DOBLES MASAS DE PRECIPITACIONES

Se realizaron las gráficas de dobles acumuladas para las precipitaciones anuales a los efectos de detectar errores presentes en los datos, en la mayoría de los casos se mantiene una buena proporcionalidad entre las estaciones contrastadas, excepto para el caso de algunas estaciones de la provincia de Buenos Aires y de la provincia de Corrientes, además de Iguazú Aero en Misiones. Las figuras se presentan en el Anexo I.

3.1.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE PRECIPITACIONES

La Tabla 10 presenta los estadísticos de las 89 estaciones analizadas, la columna "P Media" corresponde a la precipitación media anual en mm, de la serie con registros, "CV" es el coeficiente de variación adimensional, "CS" es el coeficiente de asimetría adimensional y "CK" es el coeficiente de curtosis adimensional, para las series de 1970-71 al 2009-10.

Tabla 10. Estadísticos muestrales. Precipitación anual. Serie 1971-2010.

Estación	Código	Años Completos	P Media anual (mm)	CV	CS	CK	Máx.	Mín.
Iguazú Aero	01IGUA	39	1883	0.24	0.79	0.71	2983	1091
Posadas Aero	02POSA	39	1802	0.23	1.20	1.83	3040	1212
Cerro Azul Inta	03CERI	40	1982	0.22	0.86	0.85	3146	1185
Corrientes Aero	04CORA	40	1468	0.24	0.59	-0.11	2282	972

Estación	Código	Años Com- pletos	P Media anual (mm)	CV	CS	CK	Máx.	Mín.
Colonia Benítez Inta	05COLI	40	1362	0.23	0.30	-0.84	2010	828
R S Peña Inta	07ROQI	40	1011	0.22	0.22	-0.29	1484	588
Las Breñas Inta	08BREI	39	1001	0.22	0.59	-0.05	1579	659
Resistencia Aero	09RESA	40	1412	0.22	0.54	-0.42	2081	933
Bella Vista Inta	10BELI	40	1326	0.24	0.73	0.65	2262	751
Reconquista Inta	12RECI	39	1260	0.30	1.09	1.90	2487	693
P Libres Aero	13LIBA	40	1561	0.27	1.13	2.38	3006	861
Curuzú Cuatiá Aero	14CURA	36	1375	0.27	1.14	3.01	2525	553
Monte Caseros Aero	15MONA	40	1494	0.24	0.61	-0.64	2370	974
Ceres Aero	16CERA	40	966	0.26	0.22	-0.43	1522	477
Rafaela Inta	17RAFI	40	1024	0.26	0.66	0.25	1710	639
Sauce Viejo Aero	18SAUA	39	1036	0.25	1.07	1.09	1779	690
Paraná Inta	20PARI	40	1110	0.25	0.68	0.52	1879	689
Concordia Inta	22CONI	35	1321	0.27	0.95	0.98	2295	740
C del Uruguay Inta	23URUI	40	1168	0.23	0.82	0.07	1841	736
Guaaleguaychú Aero	24GUAA	40	1143	0.24	0.78	0.08	1841	785
Oliveros Inta	25OLII	40	1031	0.21	0.30	-1.05	1428	713
Rosario Aero	26ROSA	40	1031	0.22	0.46	-0.55	1482	635
Marcos Juárez Inta	30MARI	40	903	0.23	0.42	-0.14	1426	524
Laboulaye Aero	32LABA	39	898	0.21	1.47	4.20	1608	595
San Pedro Inta	33SANI	39	1058	0.20	-0.23	-0.32	1437	553
Pergamino Inta	34PERI	39	1022	0.23	0.31	-0.71	1507	629
Junín Aero	35JUNA	39	1037	0.20	0.49	0.45	1577	653
Gral Villegas Inta	36GVII	36	859	0.21	-0.98	2.71	1261	229
Bragado Inta	37BRAI	13	1052	0.21	0.15	-0.21	1552	535
Nueve de Julio Aero	38NUEA	40	1068	0.20	0.00	0.12	1467	531
Pehuajó Aero	39PEHA	40	967	0.21	0.63	1.07	1544	520
San Miguel Aero	40SANA	40	1169	0.15	-0.37	0.27	1579	779
Aeroparque Aero	41AERA	40	1077	0.18	-0.25	-0.43	1449	685
Castelar Inta	44CASI	40	1039	0.16	0.25	0.58	1477	674
Ezeiza Aero	45EZEI	40	1005	0.19	0.37	0.11	1451	660
La Plata Aero	46PLAA	38	1054	0.20	0.29	0.28	1652	622
Punta Indio Aero	47PUNA	36	987	0.25	-0.21	0.24	1478	342

Estación	Código	Años Com- pletos	P Media anual (mm)	CV	CS	CK	Máx.	Mín.
Dolores Aero	48DOLA	35	965	0.19	-0.05	0.35	1434	553
Coronel Suárez Aero	49CNEA	38	806	0.23	0.42	0.14	1250	424
Laprida Aero	50LAPA	27	845	0.21	0.45	1.11	1348	411
Tandil Aero	51TANA	40	902	0.22	0.03	0.01	1347	459
Benito Juárez Aero	52BJUA	24	883	0.17	0.86	2.53	1405	548
Balcarce Inta	53BALI	40	918	0.19	0.27	-0.25	1347	596
Puerto Bermejo	60PBER	24	1256	0.30	-0.16	-0.45	1938	427
Paraná, Chapetón	65CHAP	31	1105	0.26	0.67	0.01	1829	645
El Toba, Margarita	67MARG	27	1142	0.30	0.85	0.10	1990	666
Fortín Olmos	68FOLM	32	1110	0.31	0.57	-0.23	1879	532
Malabrigo, RP88	70RP88	24	1249	0.29	1.19	2.46	2474	606
Saladero Cabal	71SCAB	25	1124	0.27	0.34	-0.15	1768	504
Los Amores, RN11	72RN11	30	1348	0.24	0.57	0.15	2226	741
El Rey, La Sarita	73EREY	30	1240	0.28	0.74	0.57	2195	606
Colastiné, RP50	75RP50	23	999	0.17	-0.02	-0.62	1369	614
Las Garzas, 3 Bocas	76GARZ	25	1282	0.25	0.36	1.13	2217	563
Malabrigo, RP42	77RP42	24	1232	0.26	0.77	1.15	2194	676
Pavón, Cnel Bogado	78CBOG	21	933	0.21	0.29	-0.65	1346	560
Cacique Araicaquin	79CACI	25	1097	0.27	0.30	-0.80	1764	668
San Justo	80SANJ	27	1035	0.23	0.03	-0.14	1568	528
Colonia Mascias	81CMAS	23	1123	0.25	0.23	-0.38	1689	617
Florencia	82FLOR	26	1351	0.21	0.25	0.73	2047	721
Pinar Ciba	83CIBA	31	1843	0.24	0.66	0.39	3046	1096
Colonia Mártires	84COLM	34	1958	0.23	1.48	2.46	3341	1243
Valle Hermoso	85VHER	30	1807	0.22	0.68	0.19	2907	1042
Campo Grande	86CGRA	24	1890	0.21	0.96	1.68	3105	1119
El Alcázar	87ALCA	37	1894	0.23	0.40	0.16	2923	1010
San Pedro	89SPED	27	2077	0.18	0.54	1.71	3275	1343
Torto, A del Valle	90TORT	20	1959	0.20	0.42	0.48	3011	1188
San Vicente	91SVIC	23	1913	0.19	0.47	-0.12	2777	1196
El Soberbio	92SOBE	24	1863	0.20	1.32	3.06	3058	1188
Pepiri Mini	93MINI	21	1781	0.20	0.65	1.17	2807	1148
Puerto Andresito	94PAND	25	1786	0.20	0.60	0.34	2597	1128

Estación	Código	Años Com- pletos	P Media anual (mm)	CV	CS	CK	Máx.	Mín.
Ita Cajón	96ITAC	22	1556	0.26	0.65	0.16	2553	845
Paso Juncué	99PJUN	24	1274	0.23	0.56	0.74	2111	769
La Sirena	100SIR	25	1722	0.30	0.98	0.97	3096	891
Carlos Pellegrini	101CPE	29	1356	0.28	0.60	0.54	2437	727
San Roquito	102SRO	23	1270	0.27	0.30	-0.32	2068	674
Santa Lucía	103SLU	32	1113	0.35	0.10	-1.04	1759	463
Batel-Batelito, Concp	104CON	32	1496	0.28	0.51	0.99	2628	594
Paso Cerrito	105CER	26	1242	0.29	0.93	1.46	2304	660
Garruchos	106GAR	21	1686	0.25	1.08	2.44	3074	848
Caa Carai	107CAA	21	1469	0.23	0.95	1.22	2546	929
San Carlos	108SCA	23	1735	0.20	0.75	0.73	2690	1122
Corrientes, Chavarria	109CHA	27	1285	0.28	0.71	0.30	2239	569
Pueblo Libertador	110PLI	25	1238	0.27	0.84	1.59	2286	649
Estcia. La Esperanza	111EST	30	1296	0.27	1.23	1.76	2449	846
Malvinas Sur	112MAL	33	1147	0.31	0.78	0.10	2125	605
Rivadavia	01RIVA	26	642	0.25	-0.42	0.42	1009	329
Las Lomitas	01LOMI	40	933.7	0.18	0.86	1.62	1422	604
Campo Gallo	1CAMPG	39	681	0.27	0.78	1.93	1281	329
El Colorado	01COLO	39	1167	0.25	1.00	1.51	2118	768

Se destacan altas asimetrías positivas para las estaciones de Colonia Mártires (CS= 1.48), Laboulaye (CS= 1.47) y La Sirena (CS= 1.32), acompañadas de coeficiente de curtosis elevados. El mayor coeficiente de variabilidad corresponde a Santiago del Estero con un valor de 0.54. El rango del coeficiente de variabilidad esta entre 0.15 y 0.54, mientras que el coeficiente de asimetría varía entre -0.98 en Gral Villegas y 1.76.

3.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Del mismo modo que se procedió con la información de precipitación, se analizaron los datos mensuales faltantes de las variables temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y heliofanía para retener únicamente las estaciones que sirvan a la determinación e la evapotranspiración areal de las cuencas. En este sentido se procedió a descartar aquellas estaciones que tenían muchos años faltantes, o que no disponían de alguna de las cuatro variables que requiere el método de Penman-Monteith. Resultando entonces, un total de 38 estaciones posibles de utilizar. Las mismas se presentan en la Tabla 11 junto con los valores medios de cada variable para la serie 1970-2010.

Los valores medios mensuales de la evapotranspiración potencial para la serie 1970-201 en cada estación se muestran en la Tabla 12

Por su parte la Figura 27 presenta las isolíneas de evapotranspiración potencial anuales en el periodo 1970-2010 en la zona de estudio.

Tabla 11. Estaciones con datos meteorológicos utilizadas.

Estación	Código	Temperatura		Humedad Relat		Heliofanía		Veloc. Viento	
		Años Comple-tos	Media anual (°C)	Años Comple-tos	Media anual (%)	Años Comple-tos	Media anual (hs)	Años Comple-tos	Media anual (km/d)
Iguazú Aero	01IGUA	33	21	34	80.4	18	1885.3	34	163.5
Posadas Aero	02POSA	39	21.6	39	72.6	26	2123.9	39	290.1
Cerro Azul Inta	03CERI	40	21.2	40	71.1	40	2529.9	40	162.4
Corrientes Aero	04CORA	40	21.2	40	74.6	30	2690.2	40	314.3
Colonia Benitez Inta	05COLI	40	21.5	40	74.2	40	2620.9	40	233.6
R S Peña Inta	07ROQI	39	21.5	40	70.1	40	2656.2	40	214.4
Las Breñas Inta	08BREI	39	28	39	65	38	2667.6	39	274.5
Resistencia A.	09RESA	39	21	39	75.4	27	2204.7	39	224
Bella Vista Inta	10BELI	39	21.1	37	72.5	35	2499.4	39	215.3
Reconquista Int	12RECI	39	20.1	37	75.5	24	2570.3	39	219
P Libres Aero	13LIBA	39	19.8	39	74	27	2123.8	38	348.7
Montecaseros A	15MONA	40	19.6	40	74.3	33	2628.6	40	224.7

Estación	Código	Temperatura		Humedad Relat		Heliofanía		Veloc. Viento	
Ceres Aero	16CERA	40	18.9	40	75.4	30	2647.9	39	275.5
Rafaela Inta	17RAFI	40	18.4	35	72.6	40	2679.9	34	282.7
Sauc. Viejo Aero	18SAUA	39	18.7	39	76.5	22	2662.6	39	300.6
Paraná Inta	20PARI	40	18.6	40	70.7	37	2618.9	40	311.4
Concordia Inta	22CONI	30	18.8	28	75.4	19	2557.2	24	161
C del Uruguay In	23URUI	40	18.1	38	70.4	39	2596.9	38	234.3
Gualedaychú A.	24GUAA	40	17.8	40	73.9	31	2315.9	40	220.1
Oliveros Inta	25OLII	40	18	40	74	40	2609	40	268.9
Rosario Aero	26ROSA	40	17.4	40	74.7	30	2632.8	39	348.7
M. Juárez Inta	30MARI	40	17.7	40	70	34	2600	40	216.8
Laboulaye Aero	32LABA	40	16	39	71.8	33	2648.1	40	322.5
San Pedro Inta	33SANI	40	17.2	40	73.1	38	2556.1	40	229.5
Pergamino Inta	34PERI	40	16.7	40	70.8	40	2638	38	269.8
Junín Aero	35JUNA	40	15.9	40	73.9	34	2538.6	40	291.6
Gral Villegas Inta	36GVII	19	15.9	11	70.4	13	2605.8	9	331.5
Pehuajo Aero	39PEHA	39	15.4	39	75.1	31	2611.8	39	286.1
San Miguel Aero	40SANA	37	16.9	37	75.8	30	2597.9	37	212.1
Aeroparque Aero	41AERA	40	17.8	40	72.5	31	2478.8	40	381.7
Castelar Inta	44CASI	40	17	40	69.2	40	2633	40	198
Ezeiza Aero	45EZEZ	39	16.6	39	73.6	23	1911.1	39	319.1
La Plata Aero	46PLAA	37	15.9	37	78.8	27	2541.5	36	363.6
Punta Indio Aero	47PUNA	34	16	34	81.5	30	2449.1	34	368.1
Dolores Aero	48DOLA	30	14.9	30	79.8	27	1986.1	30	253.9
Cnel Suárez Aer.	49CNEA	31	13.5	31	73.9	30	2531.3	31	276.5
Tandil Aero	51TANA	39	13.6	39	75.4	24	2297.5	40	346.4
Balcarce Inta	53BALI	40	14	40	77.7	40	2327.5	35	260

Los valores medios mensuales de la evapotranspiración potencial para la serie 1970-201 en cada estación se muestran en la Tabla 12

Tabla 12. Evapotranspiración potencial media mensual y anual (mm). Período 1970/71 al 2009/10.

Nombre Estación	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Iguazú Aero	75.3	100.4	115.6	125.1	128.6	111.6	104.8	77.0	53.9	40.3	49.0	64.7	1046
Posadas Aero	91.6	120.2	136.6	153.4	153.5	131.6	121.3	89.9	66.4	51.7	60.3	77.7	1254
Cerro Azul Inta	88.2	116.5	135.9	155.4	156.1	128.7	122.0	86.0	62.9	47.5	55.1	72.6	1227
Corrientes Aero	98.9	128.2	145.1	166.6	172.3	140.3	127.3	89.2	67.9	50.8	60.1	78.9	1325
Colonia Ben Inta	96.1	127.0	142.2	163.8	166.4	136.2	124.1	85.3	63.7	47.6	56.2	74.9	1283
R S Peña Inta	106.8	137.4	148.1	164.4	166.5	138.4	125.9	86.1	65.7	50.4	62.4	84.0	1336
Las Breñas Inta	148.0	181.7	191.9	208.6	208.7	168.8	153.6	106.0	84.7	65.9	84.4	117.1	1719
Resistencia A	88.8	116.3	130.6	145.3	150.1	127.1	112.2	79.2	58.4	43.5	52.1	70.2	1174
Bella Vista Inta	91.9	122.0	139.0	159.2	161.0	131.5	121.0	82.4	61.9	46.5	54.0	72.4	1243
Reconquista Inta	86.0	115.4	134.6	156.6	160.2	129.6	115.3	76.9	55.7	40.8	47.7	66.6	1185
P Libres Aero	85.0	115.1	138.3	159.8	164.5	130.1	116.4	82.3	58.3	43.3	50.2	68.6	1212
Montecaseros Aer	86.1	115.6	134.8	156.3	161.3	128.0	114.7	74.9	52.6	38.6	46.3	65.2	1174
Ceres Aero	92.3	125.1	146.4	161.3	165.1	133.2	117.9	80.4	58.2	42.9	49.7	70.4	1243
Rafaela Inta	81.7	111.4	135.0	154.4	159.9	125.3	109.5	72.5	50.6	36.0	41.7	61.3	1139
Sauce Viejo Aero	87.5	117.7	142.3	158.8	166.5	131.5	115.5	75.0	53.7	39.0	45.9	66.5	1200
Paraná Inta	85.4	115.7	139.2	162.8	170.1	132.8	120.1	79.4	56.2	40.8	46.2	64.6	1213
Concordia Inta	76.5	106.6	130.4	155.0	160.8	124.2	112.8	72.2	48.3	34.1	38.8	56.1	1116
C del Urug. Inta	76.4	105.9	131.5	157.3	165.6	127.5	112.4	71.6	48.2	34.0	38.7	55.8	1125
Gualeguaychú Aer	73.0	102.5	129.0	146.9	154.7	118.5	99.2	65.9	43.7	31.1	36.0	52.9	1053

Nombre Estación	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Oliveros Inta	80.4	110.0	135.7	156.1	162.1	126.0	109.1	71.3	48.8	35.0	39.6	58.5	1133
Rosario Aero	87.8	121.3	148.8	168.3	171.2	132.7	116.3	77.6	55.8	40.2	45.3	64.5	1230
M. Juárez Inta	78.7	108.2	133.6	154.6	157.8	123.4	109.1	70.7	47.7	33.1	36.9	55.5	1110
Laboulaye Aero	80.0	111.2	139.5	164.6	163.6	127.6	108.3	69.8	45.7	31.0	34.7	54.5	1130
San Pedro Inta	75.6	102.9	129.7	153.3	154.5	121.3	105.5	68.9	46.5	33.3	37.4	54.8	1084
Pergamino Inta	82.2	109.2	134.7	158.3	157.7	123.4	107.9	71.5	47.7	34.4	39.6	59.4	1126
Junín Aero	76.6	103.6	132.3	156.3	158.5	123.6	103.3	66.9	43.6	31.4	35.9	54.6	1087
Gral Villegas Inta	72.2	100.3	127.4	152.4	157.1	123.7	102.5	67.5	43.9	29.8	33.1	53.0	1063
Pehuajo Aero	70.8	100.2	127.2	154.6	156.4	122.8	105.0	66.7	43.2	30.2	33.3	49.4	1060
San Miguel Aero	73.2	102.5	129.8	155.7	162.1	124.3	106.2	66.4	43.4	30.8	34.2	51.2	1080
Aeroparque Aero	79.0	108.3	135.9	164.8	174.4	135.8	117.4	74.4	51.3	37.5	40.3	57.2	1176
Castelar Inta	66.7	94.7	120.3	147.5	155.3	120.0	101.9	63.9	40.8	28.1	31.1	46.9	1017
Ezeiza Aero	57.5	86.1	108.6	130.0	138.9	111.5	88.3	59.9	39.0	27.7	29.7	42.5	920
La Plata Aero	63.7	91.2	116.9	144.6	152.6	118.8	100.5	64.4	42.7	30.1	31.6	46.0	1003
Punta Indio Aero	72.8	99.8	127.9	158.9	166.7	128.2	106.8	67.6	43.8	30.5	33.5	52.3	1089
Dolores Aero	66.9	92.6	111.6	134.2	142.7	114.3	94.8	63.9	44.4	33.6	37.5	51.4	988
Cnel Suárez Aero	62.2	90.0	115.3	143.9	149.4	118.8	95.7	58.4	34.5	23.5	26.1	42.4	960
Tandil Aero	56.7	85.3	107.5	131.8	141.7	113.7	91.9	57.0	33.8	23.4	24.9	39.6	907
Balcarce Inta	56.7	81.9	105.7	133.2	140.7	111.3	92.3	56.4	34.0	22.7	24.8	38.9	899

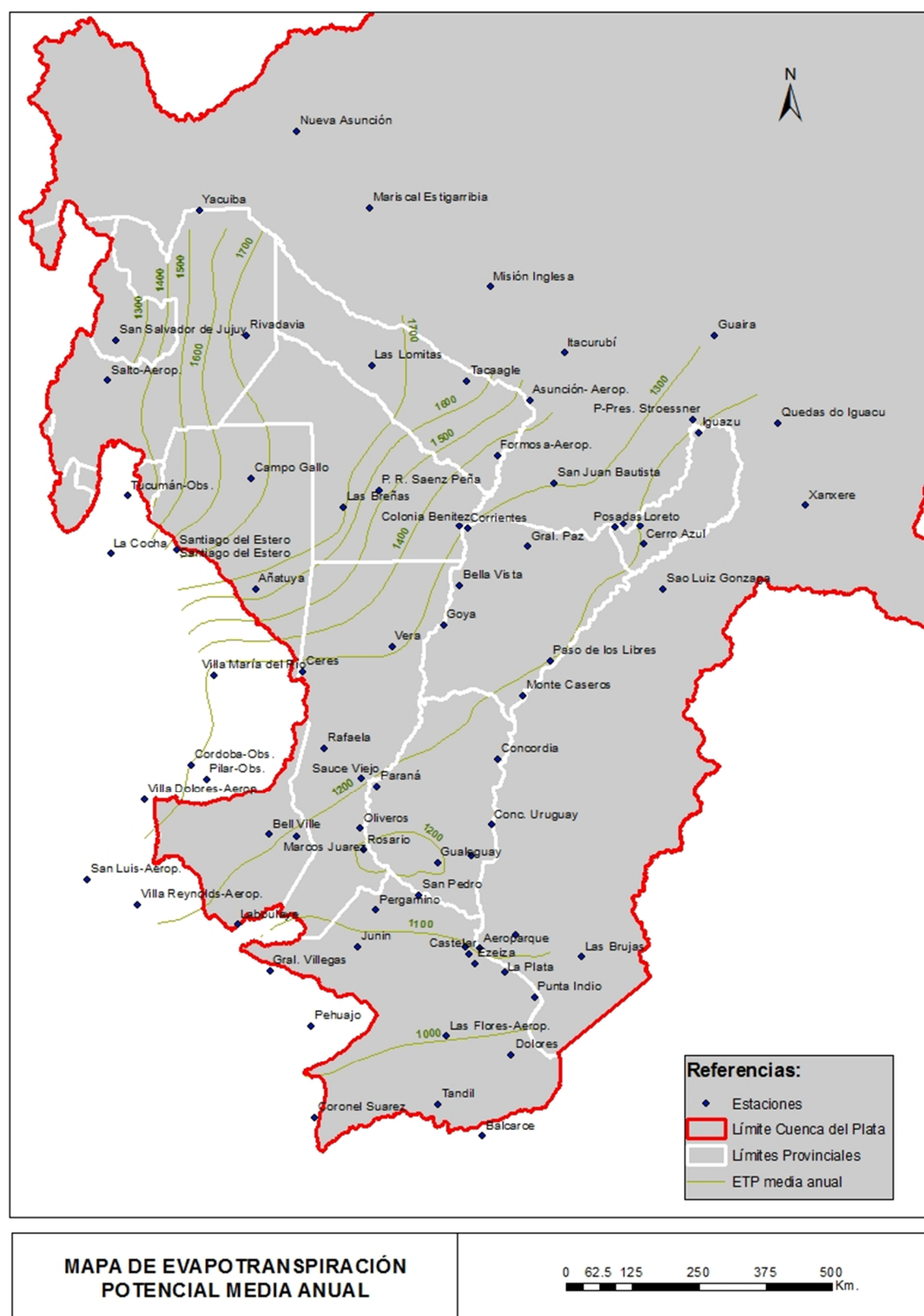


Figura 27. Isolíneas de ETP anuales zona de estudio.

3.3. ANÁLISIS Y CONSISTENCIA DE INFORMACIÓN DE CAUDALES

3.3.1. ANUARIOS DE CAUDALES

De las estaciones hidrométricas presentadas en la Tabla 3 se analizaron los anuarios de caudales, en ellos se muestran los caudales mensuales, los anuales, el módulo, los medios mensuales para la serie, además de los máximos, mínimos, los desvíos y los adimensionalizados por el módulo.

A continuación, a modo de ejemplo se presentan en la Tabla 13 el anuario de caudales para el río Bermejo en El Colorado. En las Figuras 28 a 30 se muestran los caudales anuales, las medias para toda la serie, la media cronológica incremental, los caudales medios mensuales y la relación entre el escurrimiento mensual y el escurrimiento anual. Las tablas y figuras para el total de las estaciones se encuentran en el Anexo I.

Las celdas grisadas en los anuarios, corresponde a los valores rellenados con el valor medio del mes para la serie. El correspondiente valor anual también presenta la celda grisada porque ha sido rellenado. No se completaron los años en que faltaban más de cuatro meses. Las celdas anuales en amarillo representan un valor faltante, de acuerdo al criterio precedentemente explicado.

Tabla 13. Caudales medios mensuales y anuales. Río Bermejo en El Colorado.

Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Q Medio Anual [m3/s]
1970-71	46.0	33.0	28.0	24.0	258.0	724.0	1014.0	583.0	264.0	150.0	96.0	65.0	270.8
1971-72	43.0	28.0	54.0	186.0	168.0	259.0	545.0	592.0	227.0	123.0	90.0	61.0	197.6
1972-73	38.0	25.0	32.0	215.0	470.0	890.0	913.0	1118.0	431.0	251.0	142.0	99.0	381.5
1973-74	67.0	45.0	56.0	60.0	440.0	927.0	1518.0	1802.0	566.0	275.0	186.0	138.0	502.7
1974-75	86.0	80.0	64.0	72.0	782.0	1135.0	1087.0	649.0	220.0	190.0	127.0	86.0	376.8
1975-76	60.0	45.0	48.0	256.0	752.0	1131.0	1327.0	985.0	301.0	195.0	133.0	100.0	442.0
1976-77	72.0	61.0	36.0	55.0	342.0	716.0	1401.0	1016.0	795.0	361.0	247.0	171.0	437.9
1977-78	61.7	45.9	47.7	177.8	859.7	1326.0						40.9	
1978-79	30.4	27.7	53.9	245.0	758.1	1223.0	1510.0	1305.0	481.5	193.5	131.2	42.9	495.4
1979-80	33.2	60.9	60.2	279.6	1189.0	1201.0	1457.0	1484.0	485.3	213.3	163.8	84.0	557.0
1980-81	51.4	60.9	98.8	172.3	647.1	1672.0	2259.0	1692.0	935.9	301.8	151.4	117.3	673.4
1981-82	72.7	36.3	75.6	183.9	830.0	1062.0	1664.0	2077.0	735.2	262.4	156.5	117.3	602.2
1982-83	65.0	72.1	48.9	270.4	605.3	656.5	621.0	499.2	460.8	223.1	114.9	209.8	319.0
1983-84	37.8	23.0	132.9	203.3	787.2	1043.4	1218.9	2145.0	706.3	282.4	170.6	164.8	572.9
1984-85	92.5	56.1	138.8	235.0	887.1	1457.0	1831.0	1299.0	1471.0	245.5	293.7	117.3	673.1
1985-86	120.9	99.4	284.4	396.9	1021.0								
1986-87	72.7	104.4	114.8	637.1	1656.0	1043.4	468.7	479.9	428.8	235.4	163.2	113.1	457.6

Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Q Medio Anual [m3/s]
1987-88	70.3	39.7	228.6	435.9	1238.0	1022.0	1084.0	1191.0	531.0	282.0	195.2	140.2	536.6
1988-89	81.8	57.5	29.0	71.5	309.0	327.0	656.5	854.0	318.7	193.3	159.1	95.4	261.9
1989-90	54.7	71.3	41.9	211.9	421.8	604.6	1218.9	896.5	336.6	203.2	136.4	85.9	355.6
1990-91	49.5	27.4	169.5	436.9	1161.5	1319.5	1571.1	1525.0	515.8	291.3	198.1	149.2	613.3
1991-92	111.5	98.5	231.1	322.6	1302.2	1151.0	1052.0	485.5	335.5	238.7	192.5	153.8	471.5
1992-93	109.1	86.9	99.5	509.1	1175.0	843.6	968.8	519.4	342.9	217.6	167.8	129.2	429.5
1993-94	91.8	68.4	139.1	420.3	561.4	1315.0	930.8	461.6	301.3	237.5	203.5	149.8	401.2
1994-95	85.1	122.3	388.3	333.6	674.6	1026.5	1427.1	1019.0	363.7	246.7	180.7	131.9	496.4
1995-96	84.5	52.9	44.3	289.0	467.8	1036.1	1043.0	532.9	514.2	290.7	206.8	124.2	388.7
1996-97	69.3	80.7	218.0	344.9	997.4	1327.0	1511.0	876.0	352.0	235.0	194.3	145.1	524.6
1997-98	92.5	64.7	62.8	157.0	499.0	531.6	736.3	735.1	411.0	245.3	192.0	132.5	320.4
1998-99	122.1	90.5	218.8	300.9	643.1	1294.0	1431.0	1440.0	609.6	450.0	314.5	212.5	588.6
1999-00	136.2	141.1	115.6	138.0	405.3	1086.0	1642.0	1454.0	673.5	381.9	259.7	185.8	549.0
2000-01	79.4	47.5	251.8	333.9	488.7	1437.3	1182.0	886.7	486.7	281.3	189.1	123.0	475.6
2001-02	81.8	78.3	152.9	292.8	389.1	1228.0	1400.0	1086.0	432.0	240.1	162.1	119.5	466.6
2002-03	73.6	61.1	127.4	239.3	748.6	806.2	1089.0	829.4	330.7	198.6	133.5	94.5	391.9
2003-04	67.1	58.2	52.1	267.2	920.3	985.8	791.0	749.7	392.6	238.6	143.6	90.3	394.5
2004-05	63.0	62.3	66.3	296.6	427.2	476.2	885.6	843.7	392.9	174.6	115.9	72.7	322.2

Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Q Medio Anual [m3/s]
2005-06	38.6	20.3	17.0	226.1	1058.2	1355.9	1053.6	1602.5	637.7	276.9	168.7	108.5	541.1
2006-07	78.6	60.7	103.1	676.3	1258.4	1680.8	1690.3	1095.7	399.7	243.5	150.8	104.6	622.6
2007-08	80.9	62.6	67.2	350.0	803.6	1330.4	1660.2	1632.9	493.3	231.9	176.8	113.2	580.4
2008-09	81.4	58.1	64.8	369.4	1051.3	852.8	1059.1	823.4	369.1	229.9	153.0	106.4	433.0
2009-10	61.5	43.4	75.3	699.0	1209.5	726.1	1318.8	454.1	273.9	181.3	134.7	95.4	439.8
2010-11	71.1	49.9	31.9	20.8	578.7	1377.0	1570.8	836.2	409.3	252.8	167.3	114.6	450.9
2011-12	69.6	50.1	33.1	198.2	596.5	1174.6	948.2	1091.9	579.8	253.3	160.8	102.6	435.0
1970-71 / 2011-12	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ANUAL
Promedio	72.7	60.9	104.8	276.4	758.1	1043.4	1218.9	1041.2	482.8	245.5	170.6	117.3	461.3
Max	136.2	141.1	388.3	699.0	1656.0	1680.8	2259.0	2145.0	1471.0	450.0	314.5	212.5	673.4
Min	30.4	20.3	17.0	20.8	168.0	259.0	468.7	454.1	220.0	123.0	90.0	40.9	197.6
Desvío	24.3	26.6	82.8	159.6	338.2	334.2	383.2	454.3	225.4	59.7	46.9	38.4	112.2
Q Adim.	0.2	0.1	0.2	0.6	1.6	2.3	2.6	2.3	1.0	0.5	0.4	0.3	461.3
Vol. (Hm3)	188.6	163.1	271.8	740.4	2030.4	2524.3	3264.7	2698.8	1293.2	636.2	456.9	314.1	14582.5
Vol. (%)	1.29%	1.12%	1.86%	5.08%	13.92%	17.31%	22.39%	18.51%	8.87%	4.36%	3.13%	2.15%	100.00%

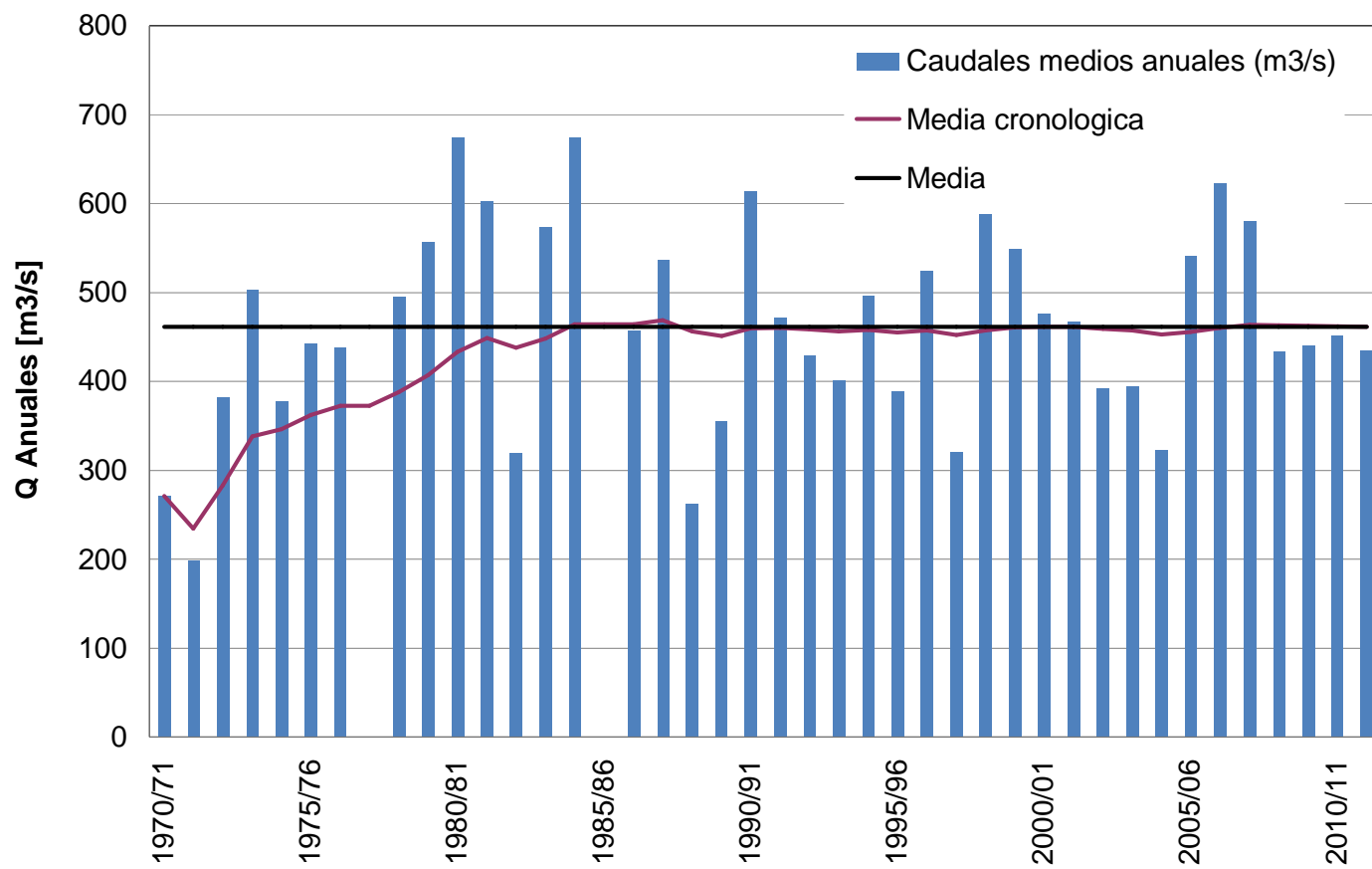


Figura 28. Caudales anuales y medias cronológicas incrementales (m3/s). Río Bermejo en El Colorado. Serie 1970/71-2011/12.

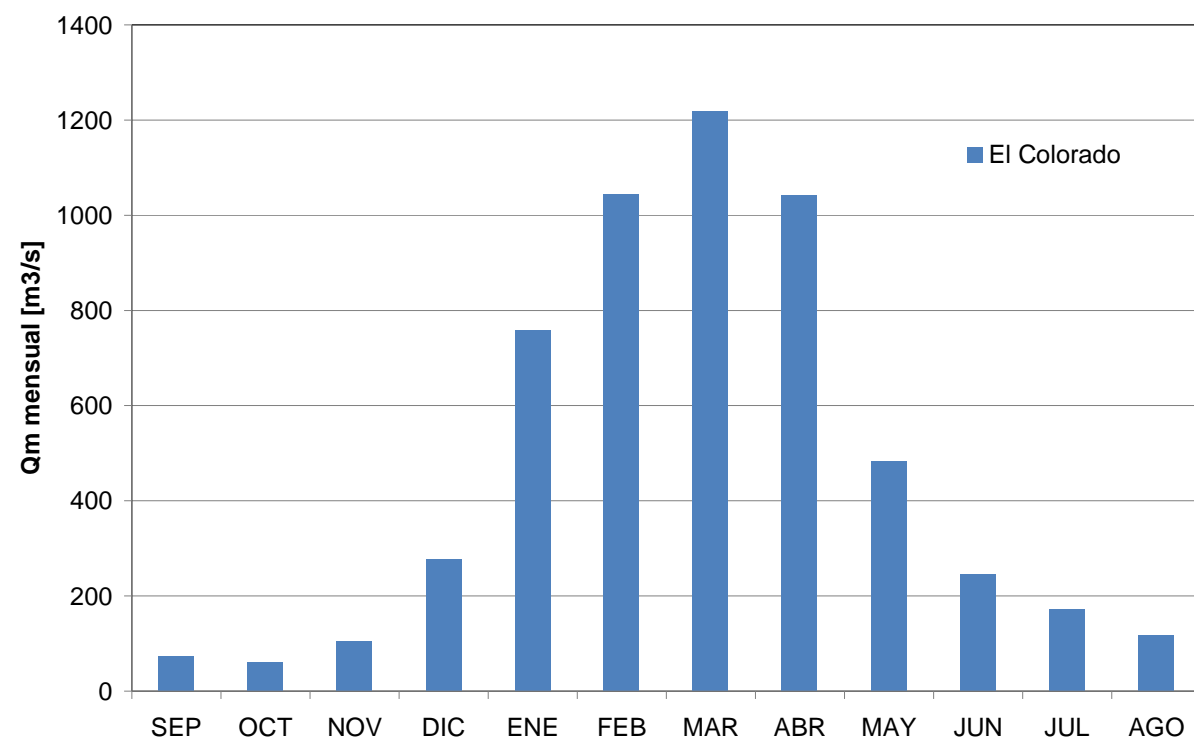


Figura 29. Caudales medios mensuales (m³/s). Río Bermejo en El Colorado.

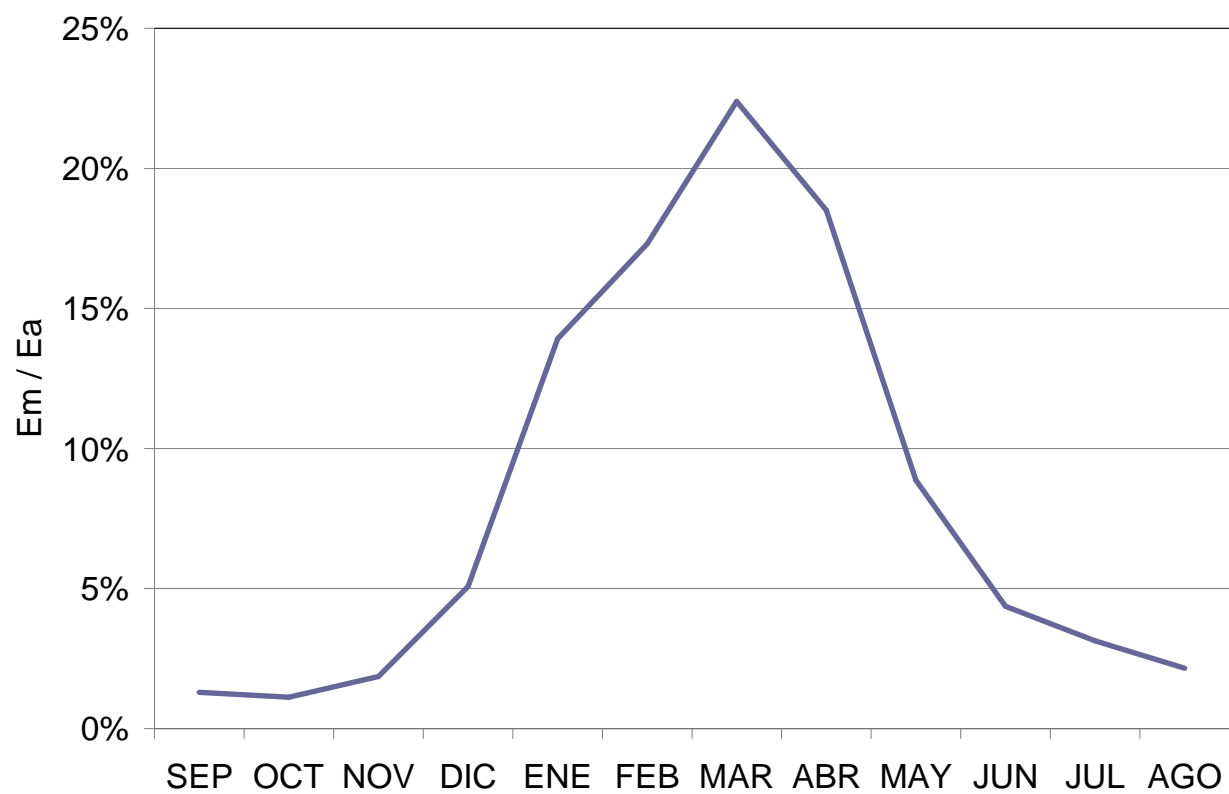


Figura 30. Esguerrimiento mensual en relación al anual (%). Río Bermejo en El Colorado.

3.3.2. DOBLES MASAS DE CAUDALES

En general las estaciones de la margen izquierda del río Paraná tienen una proporcionalidad aceptable, en cambio para las estaciones situadas sobre la margen derecha, muchas no guardan proporcionalidad entre sí, lo que se debería a la complejidad del funcionamiento hidrológico de esas cuencas y a las intervenciones antrópicas a las que están sujetas. Con respecto a las estaciones del río Uruguay, las curvas de doubles masas no evidencian falta de consistencia, al igual que las que se encuentran sobre el curso principal del Paraná. Esto se aprecia en los gráficos de doubles masas que se presentan en el Anexo I.

3.3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE CAUDALES

Se verificaron las hipótesis de homogeneidad y estacionalidad de las series de caudales anuales, para ello se aplicaron los tests no paramétricos de Mann- Kendall y de Smirnov, y el test paramétrico “t” de Student previo “F” de Fisher. Los niveles de significación alfa testeados fueron de 1, 5 y 10% para todos los tests. Los resultados obtenidos se presentan en el Anexo I. A continuación se presentan en las Tablas 14 a 18 los estadísticos muestrales calculados, siendo: Coeficiente de Variación (CV), Coeficiente de Asimetría (CS) y Coeficiente de Curtosis (CK).

Tabla 14. Estadísticos de caudales anuales. Aportes por la margen izquierda al río Paraná.

Curso	Estación	N	Media (m3/s)	Desvío (m3/s)	CS	CV	CK	Max (m3/s)	Min (m3/s)
Piray Miní	V. Hermoso	36	32.9	15.2	1.18	0.46	0.56	2.2	0.4
Piray Guazú	Pinar Ciba	35	29.4	12.1	1.11	0.41	1.24	68.4	11.7
Paranay	El Alcázar	37	22.0	9.9	0.94	0.45	0.76	52.4	6.1
Santa Lucía	Santa Lucía	37	61.3	47.6	1.42	0.78	1.53	220.7	11.2
Corriente	P. Lucero	34	165.7	115.4	1.89	0.70	3.91	603.3	28.7
Batel	P. Cerrito	20	32.9	36.1	2.65	1.10	5.23	160.6	1.3
Corriente	Los Laureles	36	251.1	190.7	1.40	0.76	1.00	768.5	39.9
Barrancas	P. La Llana	37	56.1	49.4	1.29	0.88	1.16	216.5	0.8
Guayquiraró	P. Juncué	27	28.2	21.1	1.58	0.75	2.09	96.7	2.1
Feliciano	P. Medina	36	52.8	35.4	1.08	0.67	0.18	134.5	5.0
Nogoyá	R.P. 11	24	24.1	17.4	1.67	0.72	2.10	80.6	5.1
Gualeguay	R. del Tala	20	141.9	121.6	1.63	0.86	1.69	511.6	14.2

En la Tabla 14 se destacan los máximos coeficientes de asimetría, de variabilidad y de curtosis del río Batel, pero se advierte que la muestra tiene una longitud de 20, lo que estadísticamente no es recomendable. El resto de los valores de los coeficientes se encuentran dentro de lo esperable.

Tabla 15. Estadísticos de caudales anuales. Aportes por la margen derecha al río Paraná.

Curso	Estación	N	Media (m ³ /s)	Desvío (m ³ /s)	CS	CV	CK	Max (m ³ /s)	Min (m ³ /s)
Tapenagá	Florencia	33	15.4	13.6	1.77	0.89	3.22	57.2	0.6
Los Amores	V. Oca. (RP32)	29	23.4	17.6	0.65	0.75	-0.7	62.4	0.9
El Rey	Moussy	33	32.2	28.2	1.70	0.87	2.71	132.0	1.4
Malabrigo	R.N. 11	27	12.2	10.5	1.67	0.86	1.79	44.6	0.5
El Toba	Margarita	34	11.1	9.9	1.35	0.89	0.70	41.1	0.5
Saladillo A.	V. Mujica	38	19.3	13.9	0.84	0.72	0.03	59.0	1.1
Saladillo D.	La Noria	28	13.0	12.5	1.88	0.96	3.16	57.1	0.5
Salado	R.P. 70	35	159	140.5	1.86	0.88	2.88	635.6	16.2
Carcarañá	P. Andino	29	78.3	28.0	0.91	0.36	0.75	162.0	26.8
Pavón	Cnel Bogado	24	10.6	6.5	1.01	0.61	0.30	25.9	3.6
Del Medio	La Emilia	19	9.4	7.6	1.10	0.80	-0.7	25.7	1.3

Tabla 16. Estadísticos de caudales anuales. Aportes del río Bermejo.

Curso	Estación	N	Media (m ³ /s)	Desvío (m ³ /s)	CS	CV	CK	Max (m ³ /s)	Min (m ³ /s)
Bermejo	Pozo Sarmiento	41	429.0	108.6	0.04	0.25	-0.9	634.0	223.1
S Francisco	Caimancito	35	113.4	40.4	0.88	0.36	1.19	245.2	43.3
Bermejo	El Colorado	40	461.3	112.2	-0.14	0.24	-0.5	673.4	197.6

Tabla 17. Estadísticos de caudales anuales. Aportes por la margen derecha al río Uruguay.

Curso	Estación	N	Media (m³/s)	Desvío (m³/s)	CS	Cv	CK	Max (m³/s)	Min (m³/s)
Aguapey	Caa Carai	23	32.7	18.9	1.33	0.58	1.00	87.5	8.2
Aguapey	La Sirena	24	76.9	41.8	1.06	0.54	0.49	194.7	16.6
Miriñay	San Roquito	33	84.7	54.6	1.11	0.64	0.26	233.2	12.2
Miriñay	P. Ledesma	36	142.8	99.2	1.25	0.69	0.79	446.3	10.8
Yuquerí Grande	Concordia	19	4.5	2.9.0	0.47	0.64	-1.2	9.9	1.1
Gualedguaychú	R. P N 39	22	15.2	12.9	1.44	0.85	-1.0	50.5	1.0

Tabla 18. Estadísticos de caudales anuales. Ríos Principales.

Curso	Estación	N	Media (m³/s)	Desvío (m³/s)	CS	Cv	CK	Max (m³/s)	Min (m³/s)
Iguazú	Puerto A.	29	1718.7	536.3	1.22	0.31	1.23	3406	957
Paraguay	Pto Pilcomayo	42	3924.1	1367.7	1.16	0.35	2.02	8872	1478
Paraguay	Pto. Bermejo	23	4691.5	1139.0	0.46	0.24	0.88	7810	2126
Paraná	Itatí	40	13922	2901.6	2.19	0.21	6.28	26383	10287
Paraná	Corrientes	42	18980	4177.6	2.34	0.22	7.60	37834	12755
Paraná	Sta Fe	42	19001	3843.6	1.49	0.20	1.32	33653	12403
Uruguay	El Soberbio	31	2366.3	957.0	2.11	0.40	3.61	5558	1399
Uruguay	Garruchos	42	3106.7	1221.9	1.90	0.39	3.67	7486	1666
Uruguay	P. de los Libres	42	4726.5	1955.8	1.72	0.41	2.74	11335	2257

4. RESULTADOS DE CAMPOS AREALES, MODELACIÓN Y COMPARACIÓN CON MEDIDAS

El Balance Hídrico Superficial fue una de las actividades previstas dentro del Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata, llevado a cabo por el Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata en relación con los efectos de variabilidad y cambio climático. Este Balance Hídrico Superficial se realizó como parte del Balance Hídrico Integrado, pensado como instrumento de apoyo para la gestión integrada de los recursos hídricos de la Cuenca, teniendo en cuenta la distribución, la calidad, el uso y demanda del agua.

Como se mencionó anteriormente, en base estas modelaciones se probaron diferentes campos de precipitación y evapotranspiración potencial, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en los balances según las diferentes técnicas. Los resultados contrastados se limitan a la margen izquierda del río Paraná, en un total de 12 cuencas que disponen de registros de caudales. El listado de las mismas se corresponde con la Tabla 14 y su ubicación se encuentra en la Figura 20. En el Anexo II se presentan las figuras con los planos de detalle de las cuencas.

4.1.DETERMINACIÓN DE LOS CAMPOS DE PRECIPITACIÓN Y DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

4.1.1. MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN

Esta metodología fue aplicada para la estimación de la precipitación y de la evapotranspiración potencial media de cada subcuenca durante el cálculo del balance presentado en el informe “Balance hídrico superficial de la Cuenca del Plata en territorio argentino”. El procedimiento se realiza en forma automática con el programa CHAC, el que ofrece como resultado las series mensuales para cada subcuencas.

La Figura 31 muestra los polígonos resultantes para las cuencas aforadas (color marrón) de la margen izquierda del río Paraná. Por su parte la Tabla 19, presenta para cada subcuenca, el área correspondiente a cada estación de precipitación mediante los polígonos determinados.

Para la determinación de la evapotranspiración potencial areal se utilizaron los polígonos que se muestran en la Figura 32. La Tabla 20 muestra los pesos calculados.

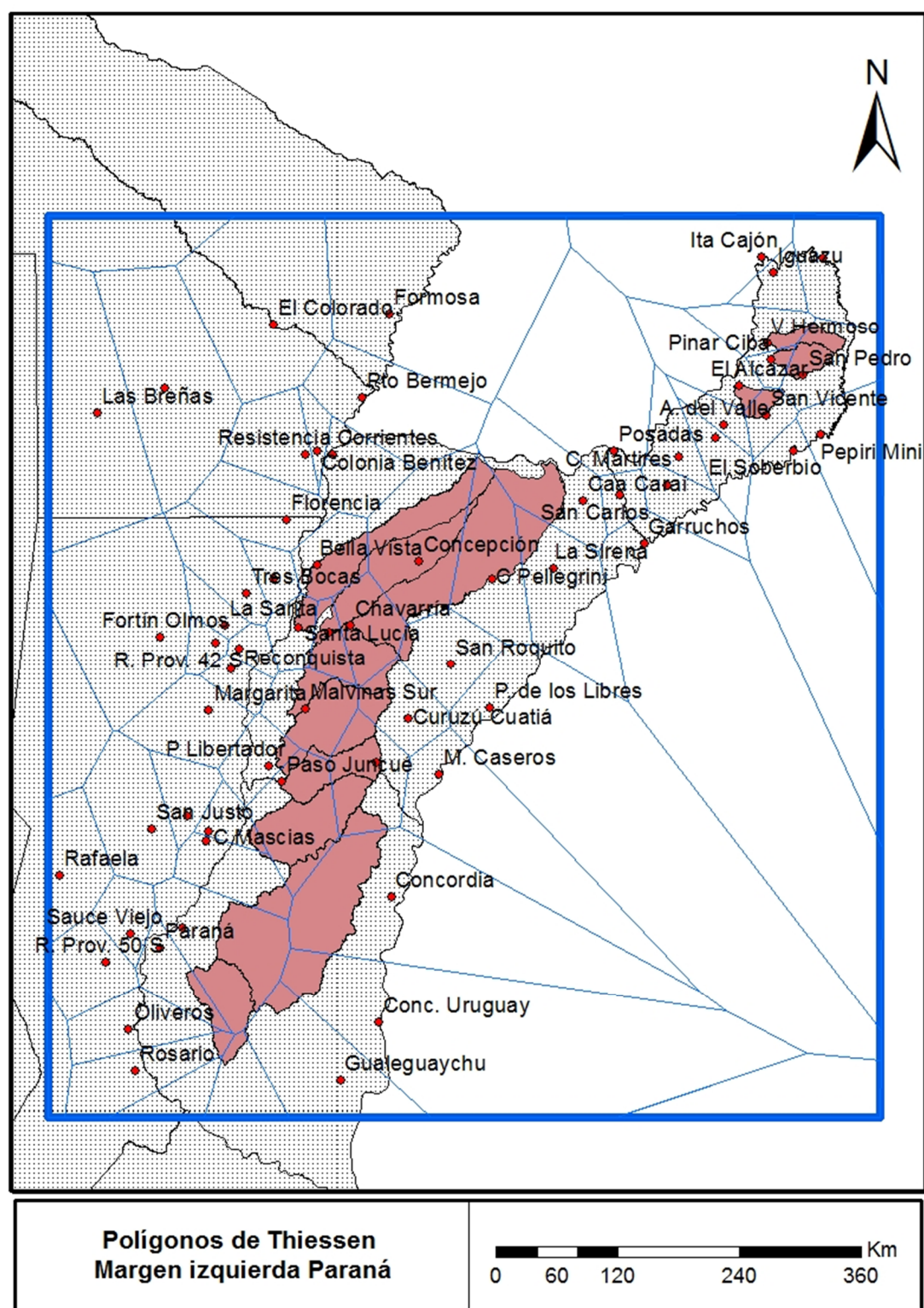


Figura 31. Trazado de Polígonos de Thiessen para las estaciones de precipitación en cuencas aforadas de margen izquierda río Paraná.

Tabla 19. Áreas estaciones pluviométricas según Polígonos de Thiessen en cuencas de margen izquierda río Paraná.

Cuenca	Estación Aforo	Área Total (km ²)	Lugar	Estación Pluviométrica	Código	Área Parcial (km ²)	Peso s/ Área Total
A° Piray Mini	V. Hermoso	1220	Piray Guazú	Pinar Ciba	83CIBA	47.2	0.04
			Piray Miní	V Hermoso	85VHER	489.2	0.40
			Yabotí	San Pedro	89SPED	683.7	0.56
A° Piray Guazú	Pinar Ciba	1316	Piray Guazú	Pinar Ciba	83CIBA	273.4	0.21
			Yabotí	San Pedro	89SPED	1042.6	0.79
A° Paranay	El Alcazar	979	Paranay	El Alcazar	87ALCA	352.1	0.36
			Yabotí	San Pedro	89SPED	9	0.01
			Soberbio	San Vicente	92SOBE	617.4	0.63
Río Santa Lucía	Santa Lucia	6521	Bella Vista	Bella Vista	10BELI	2177.7	0.33
			Laguna Iberá	C Pellegrini	101CPE	600.1	0.09
			Santa Lucia	Santa Lucia	103SLU	559.3	0.09
			Batel-Batelito	Concepción	104CON	2943.3	0.45
			Batel	Paso Cerrito	105CER	188.9	0.03
			Corriente	Chavarría	109CHA	51.6	0.01
Río Corriente	Paso Lucero	13011	Aguapey	La Sirena	100SIR	1012.4	0.08
			Laguna Iberá	C Pellegrini	101CPE	5039.9	0.39
			Miriñay	San Roquito	102SRO	289.3	0.02
			Batel-Batelito	Concepción	104CON	2594.3	0.20
			Aguapey	Caa Carai	107CAA	2370.7	0.18
			Corriente	Chavarría	109CHA	1705	0.13
Río Batel	P. Cerrito	5592	Bella Vista	Bella Vista	10BELI	182.4	0.03
			Laguna Iberá	C Pellegrini	101CPE	90.1	0.02
			Batel-Batelito	Concepción	104CON	3487.4	0.62
			Batel	Paso Cerrito	105CER	377.5	0.07
			Corriente	Chavarría	109CHA	1454.2	0.26
Río Corriente	Los Laureles	4481	Corriente	Chavarría	109CHA	1700.30	0.38
			Batel	Paso Cerrito	105CER	1447.12	0.32
			Sarandí	Malvinas Sur	112MAL	868.05	0.19
			Curuzú Cuatiá A	Curuzú Cuatiá A	14CURA	465.53	0.10
Río	P La Llana	5520	Curuzú Cuatiá	Curuzú Cuatiá	14CURA	730.8	0.13

Barrancas							
			Guayquiraró	Paso Juncué	99PJUN	272.4	0.05
			Guayquiraró	P Libertador	110PLI	412.4	0.07
			Guayquiraró	E. Esperanza	111EST	902.2	0.16
			Sarandí	Malvinas Sur	112MAL	3202.3	0.58
Río							
Guayquiraró	Paso Juncué	3130	Guayquiraró	Paso Juncué	99PJUN	1500.1	0.48
			Guayquiraró	E. Esperanza	111EST	1513.2	0.48
			Sarandí	Malvinas Sur	112MAL	116.4	0.04
A° Feliciano							
	Paso Medina	5545	San Javier	Salad. Cabal	71SCAB	33.8	0.01
			San Javier	C Mascias	81CMAS	247	0.04
			Guayquiraró	Paso Juncué	99PJUN	3975.4	0.72
			Guayquiraró	E. Esperanza	111EST	1288.6	0.23
A° Nogoyá							
	RP 11	3889	Paraná	Paraná	20PARI	646	0.17
			Oliveros	Oliveros	25OLI	30.3	0.01
			Rosario A	Rosario A	26ROSA	327.5	0.08
			San Pedro	San Pedro	33SANI	394.8	0.10
			Paraná	Chapetón	65CHAP	2490.5	0.64
Río							
Gualedguay	Ros. del Tala	15975	Concordia	Concordia	22CONI	6579.1	0.41
			Conc. Uruguay	Conc. Uruguay	23URUI	1609.1	0.10
			Gualedguaychú	Gualedguaychú	24GUAA	605.2	0.04
			Paraná	Chapetón	65CHAP	4813.9	0.30
			San Javier	Salad. Cabal	71SCAB	823.5	0.05
			Guayquiraró	Paso Juncué	99PJUN	803.9	0.05
			Guayquiraró	E. Esperanza	111EST	740.5	0.05

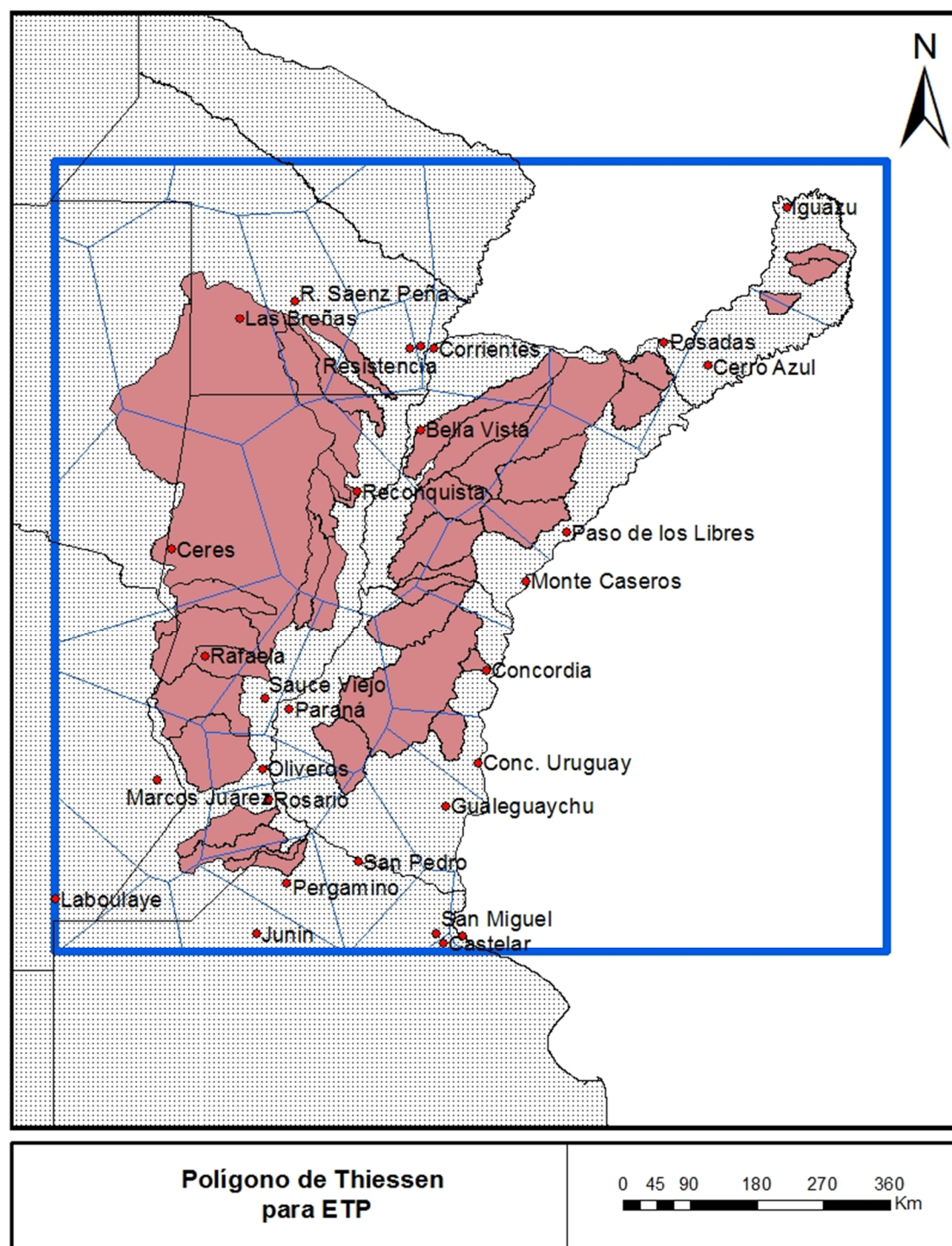


Figura 32. Trazado de los polígonos de Thiessen para las estaciones con datos climáticos.

Tabla 20. Áreas estaciones climáticas según Polígonos de Thiessen. Margen izquierda del río Paraná.

Cuenca	Estación Aforo	Área Total (km2)	Lugar	Estación Pluviométrica	Código	Área Parcial (km2)	Peso s/ Área Total
Piray Mini	Valle Hermoso	1220	Iguazú A	Iguazú A	01IGUA	1220.1	1.00
Piray Guazú	Pinar Ciba	1316	Iguazú A	Iguazú A	01IGUA	1316.0	1.00
Paranay	El Alcázar	977	Iguazú A	Iguazú A	01IGUA	502.4	0.51
			Cerro Azul	Cerro Azul	03CERI	476.2	0.49
Santa Lucía	Santa Lucía	6521	Posadas A	Posadas A	02POSA	527.8	0.08
			Corrientes A	Corrientes A	04CORA	2195.3	0.34
			Bella Vista	Bella Vista	10BELI	3797.9	0.58
Corriente	P. Lucero	13011	Posadas A	Posadas A	02POSA	5689.4	0.44
			Corrientes A	Corrientes A	04CORA	241.6	0.02
			Bella Vista	Bella Vista	10BELI	3649.9	0.28
			P. Libres A	P. Libres A	13LIBA	3430.6	0.26
Batel	P. Cerrito	5592	Corrientes A	Corrientes A	04CORA	491.2	0.09
			Bella Vista	Bella Vista	10BELI	5100.5	0.91
Corriente	Los Laureles	4481	Monte Caseros A	Monte Caseros A	15MONA	571.9	0.13
			Reconquista	Reconquista	12RECI	1171.0	0.26
			Bella Vista	Bella Vista	10BELI	2738.1	0.61
Barrancas	La Llana	5520	Bella Vista	Bella Vista	10BELI	38.1	0.01
			Reconquista	Reconquista	12RECI	3003.5	0.54
			M. Caseros A	M. Caseros A	15MONA	2478.6	0.45
Guayquiraró	Paso Juncué	3130	Reconquista	Reconquista	12RECI	723.6	0.23
			M. Caseros A	M. Caseros A	15MONA	1996.7	0.64
			Concordia	Concordia	22CONI	409.4	0.13
Feliciano	Paso Medina	5545	M. Caseros A	M. Caseros A	15MONA	838.2	0.15
			Paraná	Paraná	20PARI	296.1	0.05
			Concordia	Concordia	22CONI	4410.4	0.80
Nogoyá	RP 11	3889	Paraná	Paraná	20PARI	3109.9	0.80
			Gualeguaychú	Gualeguaychú	24GUAA	32.7	0.01
			Oliveros	Oliveros	25OLII	30.3	0.01
			Rosario A	Rosario A	26ROSA	335.3	0.09
			San Pedro	San Pedro	33SANI	380.9	0.10
Gualeguay	R. del Tala	15975	Paraná	Paraná	20PARI	4180.9	0.26
			Concordia	Concordia	22CONI	9018.0	0.56
			C. Uruguay	C. Uruguay	23URUI	1905.6	0.12
			Gualeguaychú	Gualeguaychú	24GUAA	870.9	0.05

Las Tablas 21 y 22 muestran respectivamente, los valores medios mensuales y anuales de precipitación y evapotranspiración en cada subcuenca.

Tabla 21. Precipitación mensual areal (mm) en cuencas margen izquierda del río Paraná. Período 1970-71 al 2009-10. Método de Thiessen.

Río	Lugar	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Piray Mini	V. Hermoso	168	236	166	168	162	165	141	175	168	164	111	137	1960
Piray Guazú	Pinar Ciba	172	245	177	174	163	168	141	183	176	172	116	143	2028
Paranay	El Alcazar	157	232	166	152	158	150	158	163	153	151	124	114	1876
Santa Lucía	Santa Lucia	76	149	151	124	129	158	153	178	81	78	54	50	1383
Corrientes	Paso Lucero	91	159	146	124	122	141	140	173	98	92	75	62	1422
Batel	Paso Cerrito	78	152	156	120	126	163	146	186	90	86	59	54	1415
Corriente	Los Laureles	82	148	146	122	123	145	138	172	92	84	65	56	1371
Barrancas	P. La Llana	67	123	120	121	127	130	148	158	76	63	42	39	1214
Guayquiraró	Paso Juncué	69	126	130	132	137	141	158	162	82	63	39	41	1280
Feliciano	Paso Medina	66	123	134	133	142	142	161	163	81	54	35	40	1272
Nogoyá	Ruta Pcial 11	59	118	117	128	114	130	154	113	59	40	29	34	1094
Gualeguay	Ros. del Tala	77	119	129	127	124	132	149	133	82	61	44	45	1221

Tabla 22. Evapotranspiración potencial media mensual (mm) en cuencas margen izquierda del río Paraná. Período 1970-71 al 2009-10. Método de Thiessen.

Río	Lugar	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Piray Mini	V. Hermoso	82	111	135	154	160	125	110	73	51	36	42	61	1139
Piray Guazú	Pinar Ciba	75	100	116	125	129	112	105	77	54	40	49	65	1046
Paranay	El Alcazar	82	108	126	140	142	120	113	81	58	44	52	69	1135
Santa Lucía	Santa Lucia	94	124	141	161	164	135	123	85	64	48	57	75	1272
Corrientes	Paso Lucero	90	120	138	157	159	131	120	86	63	48	56	74	1241
Batel	Paso Cerrito	93	123	140	160	162	132	122	83	62	47	55	73	1250
Corriente	Los Laureles	90	119	137	156	158	130	119	83	62	47	54	72	1227
Barrancas	P. La Llana	86	116	135	157	161	129	115	76	54	40	47	66	1181
Guayquiraró	Paso Juncué	85	114	134	156	161	128	115	75	53	39	46	64	1169
Feliciano	Paso Medina	78	108	131	156	161	125	113	73	49	35	40	58	1129
Nogoyá	Ruta Pcial 11	85	116	140	164	170	133	119	79	56	40	46	64	1211
Gualeguay	Ros. del Tala	78	107	131	154	160	125	112	73	50	36	41	58	1123

4.1.2. MÉTODOS DE REGIONALIZACIÓN

Como se mencionó en la metodología se aplicaron dos métodos de regionalización: análisis de agrupamiento (por el método Ward) y L-momentos.

- Para la precipitación

Para la aplicación del método **Ward** de clusterización, se utilizaron en cada estación las series de precipitación promedios mensuales del período, resultando tantos valores por mes como estaciones se utiliza. Los estadísticos de estas series se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Estadísticos de la precipitación media mensual de la serie 1970-2010.

	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
N	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
Min	13.8	40.6	74.7	78.5	89.9	66.9	87.6	51.2	16.9	7.5	1.9	2.9
Max	178.5	250.6	182.6	181.0	178.7	178.0	186.1	217.1	190.9	179.0	139.6	149.6
Media	80.0	134.7	129.4	128.5	134.3	132.3	138.6	135.2	83.1	67.3	53.0	53.1
Varianza	1628	2331	806	471	465	537	459	1669	1780	1876	118	1108
Desvío est.	40.4	48.3	28.4	21.7	21.6	23.2	21.4	40.9	42.2	43.3	34.4	33.3
Mediana	63.9	116.7	126.0	128.3	131.4	131.8	142.2	140.8	69.7	52.5	41.5	40.7
25 prcntil	56.1	106.7	104.6	113.1	119.3	116.7	126.1	96.4	55.1	37.4	29.2	31.3
75 prcntil	95.9	149.0	152.1	142.5	148.6	152.2	154.6	167.1	96.5	87.9	70.3	65.6
C. asimetría	1.1	0.9	0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.5	-0.2	1.0	1.0	0.9	1.1
C. curtosis	0.0	-0.1	-1.0	-0.2	-0.6	-0.3	-0.1	-1.1	0.0	-0.1	-0.2	0.2
C. variab.	0.50	0.36	0.22	0.17	0.16	0.18	0.15	0.30	0.51	0.64	0.65	0.63

Los meses que mayor asimetría presentan son entre mayo y octubre con valores cercanos a 1. Los meses de verano tienen baja asimetría e incluso negativa. Los mayores coeficientes de variabilidad se dan en los meses de junio julio y agosto en el orden del 64%, esto se debe a las características de estacionalidad que tienen algunos sitios que en los meses de invierno prácticamente no registran lluvias. Mientras que la mínima variabilidad corresponde a 15.4 % en marzo donde la precipitación es más uniforme espacialmente.

Mediante el uso del programa PAST (PAleontological STatistics) desarrollados por el Museo de Historia Natural de la Universidad de Oslo (Hammer et al., 2001), se aplicó la metodología del método Ward para 89 estaciones en el período 1970-2010 para definir las regiones pluviométricas homogéneas. Se consideraron tres juegos de datos, con la finalidad de comparar los dendrogramas resultantes y determinar cuáles grupos conformados representaría mejor el campo de precipitación.

- i. Series de precipitación media para cada mes
- ii. Series de precipitación media para cada mes incluida la anual
- iii. Series de precipitación media para cada mes incluida la anual, estandarizados

A partir de los dendrogramas se define el nivel de corte a adoptar. Se optó por dividir por dos la varianza total (distancia máxima) y luego volver a dividirla hasta tener una cantidad de estaciones equilibradas en cada grupo conformado, lo que resultó en siete grupos de estaciones.

A continuación se presentan los dendrogramas resultantes para las tres serie de precipitaciones, indicando la línea roja el nivel de corte adoptado (Figura 32 a 35).

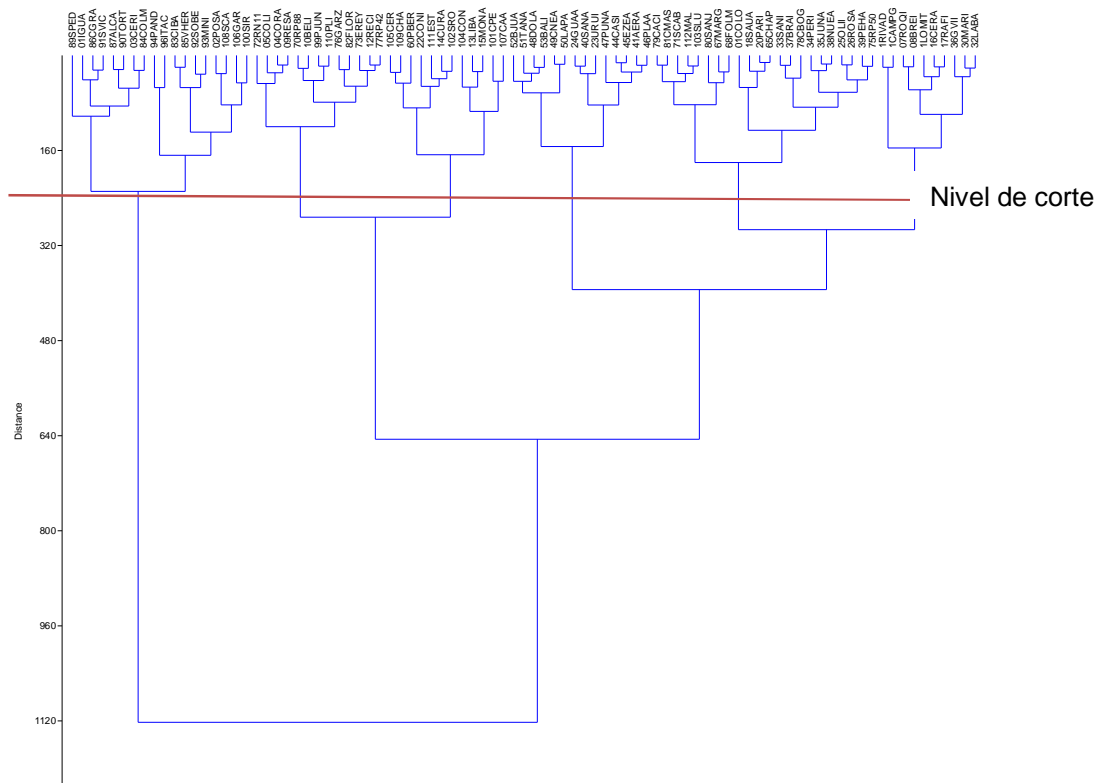


Figura 33. Dendrograma para la serie de precipitación medias mensuales.

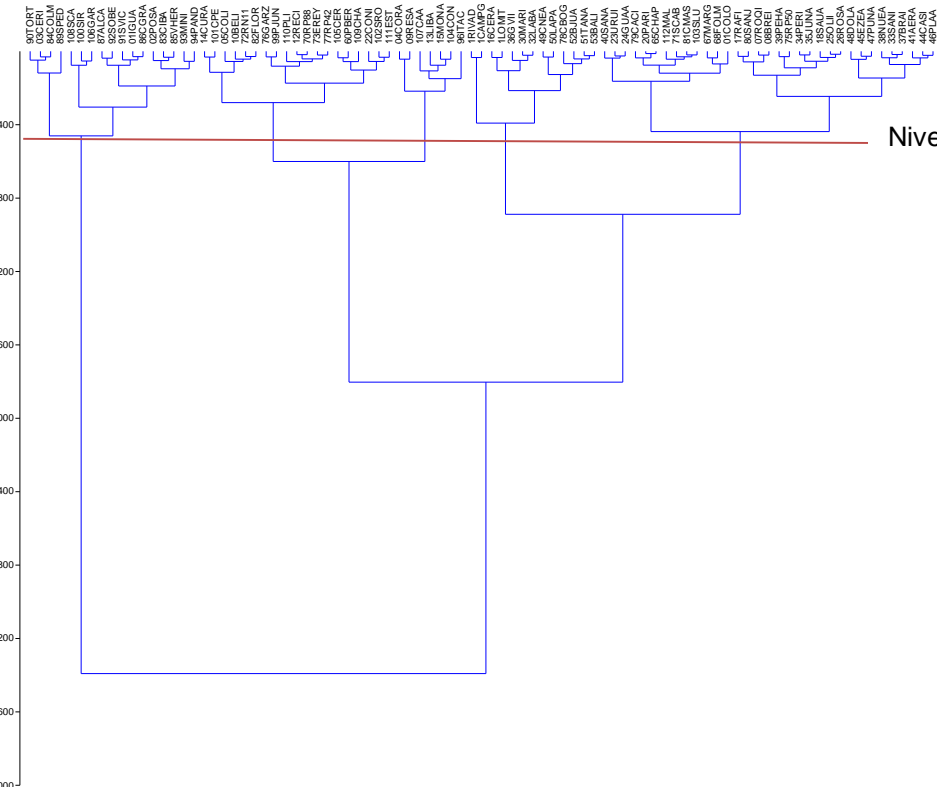


Figura 34. Dendrograma para la serie de precipitación medias mensuales y anuales.

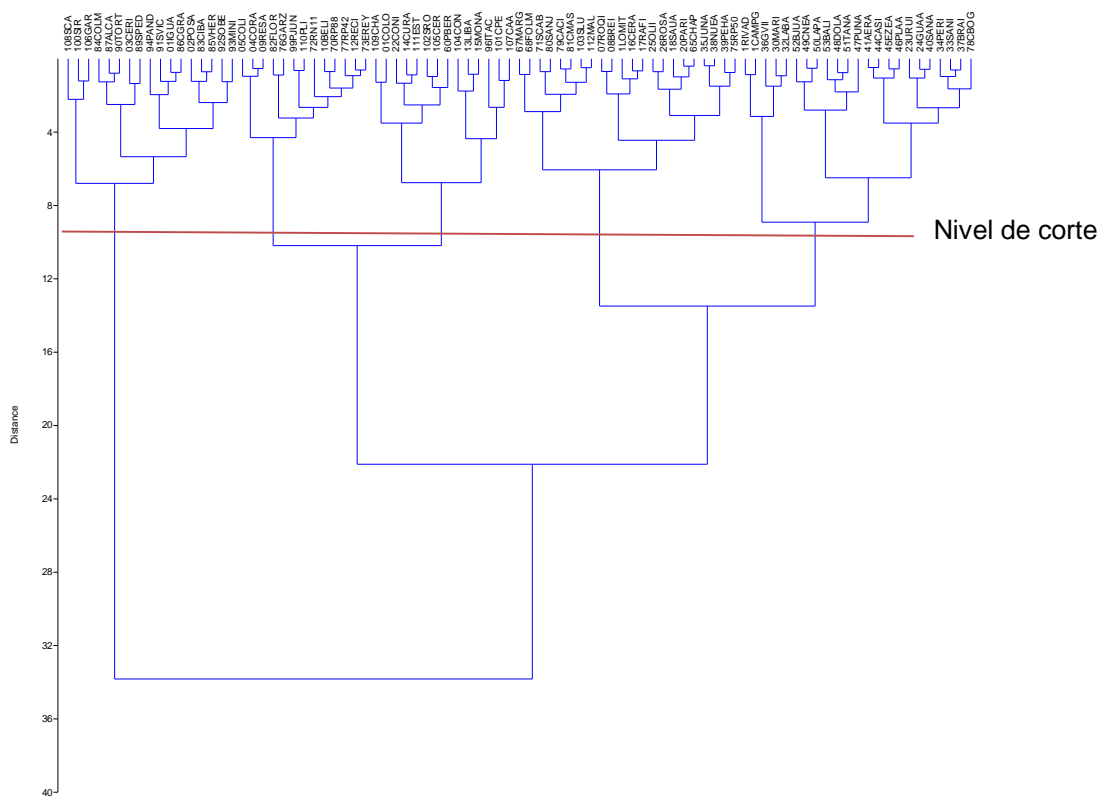


Figura 35. Dendrograma para la serie de precipitación con valores estandarizados.

En el caso de la Figura 34 se aprecia que el valor de la varianza total se ve incrementado por la presencia de los valores anuales.

De los tres dendrogramas resultantes, según los niveles de cortes adoptados, se obtuvieron 7 grupos para las series mensuales y mensuales con anual, y 6 grupos para la serie estandarizada.

Los grupos definidos resultaron bastante similares para las series de i) sólo valores mensuales y de iii) valores mensuales y anuales estandarizados. Se obtuvieron las mayores diferencias entonces, con el que incluía la precipitación anual (ii). Se concluye que es por estar usando en la misma serie valores estacionales junto con valores anuales, que ya engloban estos comportamientos, mientras que las series de valores estandarizados, es una forma de llevarlo a valores comparables, donde se anulan las diferencias en los órdenes de magnitud entre las precipitaciones mensuales y las anuales.

Las Figuras 36 a la 38 muestran la ubicación de las estaciones para cada grupo en cada serie analizada. Cada color corresponde a un grupo.

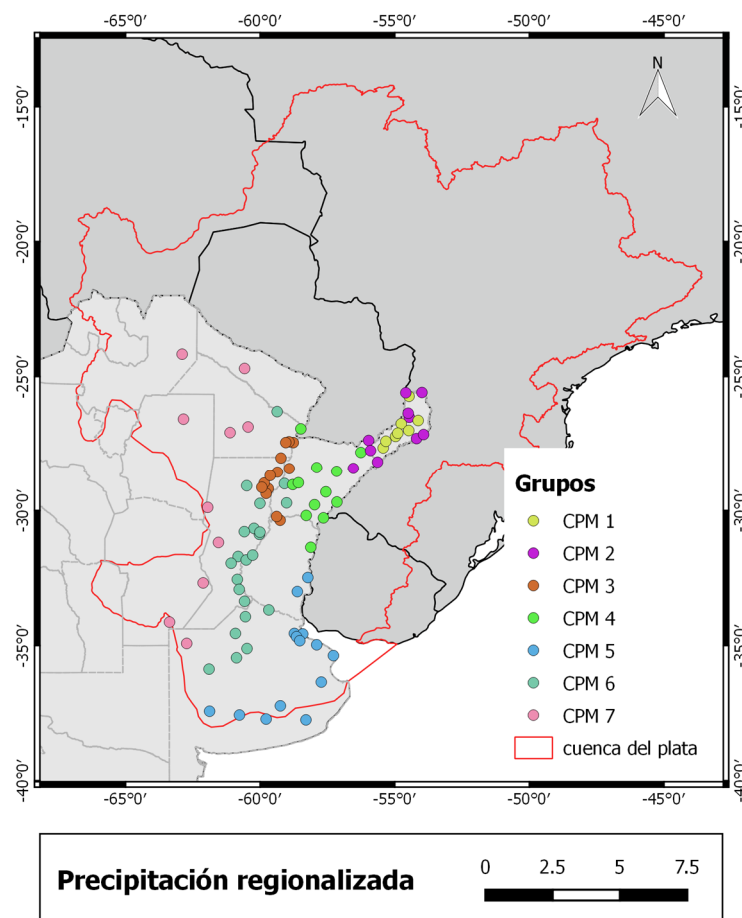


Figura 36. Regionalización de precipitación mensual obtenida mediante método Ward.

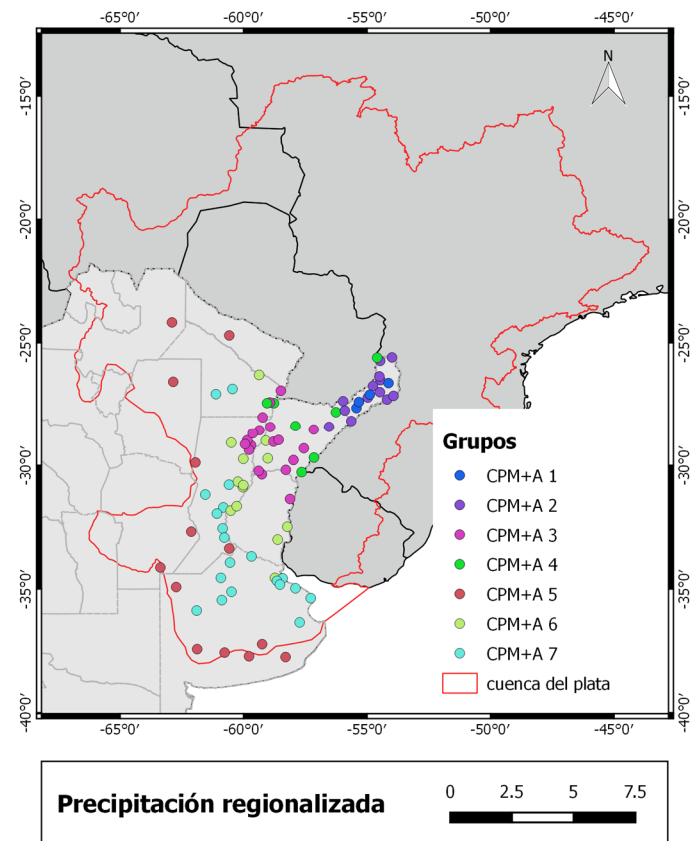


Figura 37. Regionalización de precipitación mensual y anual obtenida mediante Ward.

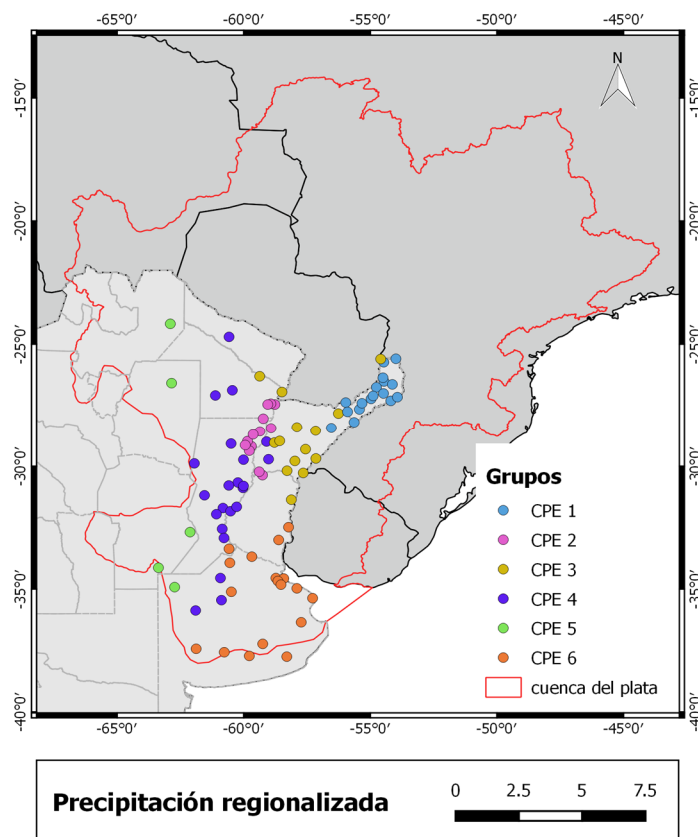


Figura 38. Regionalización de precipitación mensual y anual estandarizada obtenida mediante método Ward.

A continuación las Tablas 24 a 26 presentan las precipitaciones mensuales promediadas de cada grupo obtenido con las 3 series de precipitaciones analizadas. Las Figuras 39 a 41 muestran la representación gráfica de estos valores.

Para la identificación de los grupos se usó la siguiente nomenclatura:

- CPM: cluster precipitación mensual
- CPM+A: cluster precipitación mensual y anual
- CPE: cluster precipitación mensual y anual, estandarizadas

Tabla 24. Precipitación media mensual (mm) para cada región obtenida por método Ward con serie medias mensuales 1970-2010.

Grupo	Cant. estac	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
CPM 1	8	162.9	228.3	176.5	163.5	171.4	156.9	144.1	181.6	163.6	155.9	119.5	120.5	1945
CPM 2	10	144.3	211.7	156.3	149.0	153.3	147.9	133.9	169.1	150.6	133.5	104.3	104.2	1758
CPM 3	13	63.7	128.6	149.5	141.8	150.6	154.0	166.3	169.1	68.4	50.9	33.1	34.8	1311
CPM 4	12	86.3	142.6	142.0	122.5	128.2	142.1	144.5	167.7	93.9	81.0	63.3	54.1	1368
CPM 5	14	64.6	105.7	96.7	98.2	107.6	103.7	109.2	89.9	67.8	50.6	51.5	51.7	997
CPM 6	22	56.5	109.7	113.2	121.0	124.7	125.5	141.2	116.0	57.5	39.6	30.4	33.4	1068
CPM 7	10	36.2	77.0	105.2	128.6	130.4	111.9	131.4	86.5	35.3	19.7	14.1	15.7	892

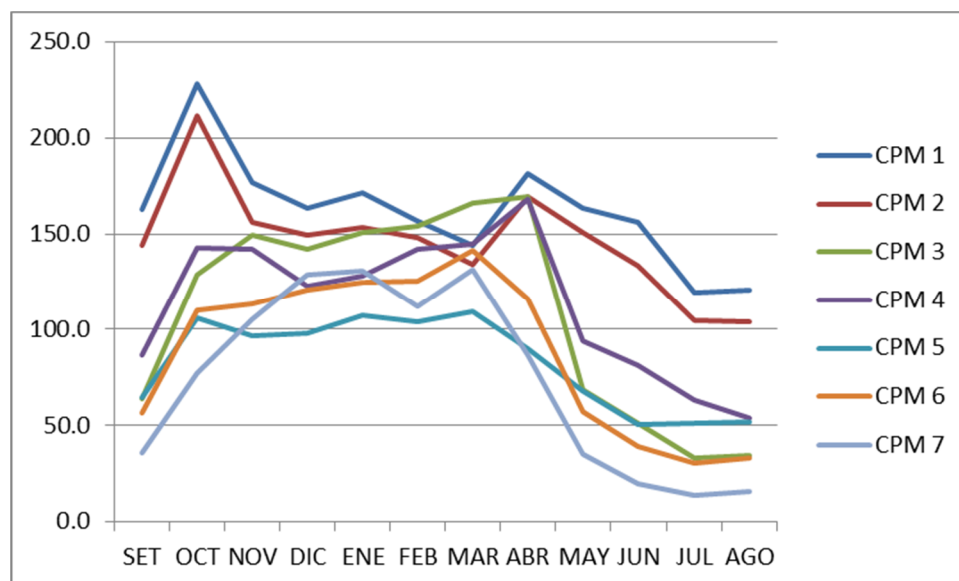


Figura 39. Regionalización de precipitación mensual obtenida mediante método Ward con serie medias mensuales 1970-2010.

Tabla 25. Precipitación media mensual (mm) para cada región obtenida por método Ward con serie medias mensuales y anuales 1970-2010.

Grupo	Cant. estac	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
CPM+A 1	4	169.8	231.6	176.1	169.9	172.3	165.9	152.0	190.5	162.8	157.8	118.0	127.3	1994
CPM+A 2	13	149.7	217.0	162.8	152.7	159.8	149.3	136.6	173.0	153.2	141.2	111.9	108.7	1816
CPM+A 3	19	69.5	129.4	144.0	132.2	138.1	146.8	155.2	164.5	74.2	58.8	41.7	38.5	1293
CPM+A 4	7	95.1	160.1	152.5	133.4	144.4	149.9	150.8	174.0	111.1	90.4	66.9	64.8	1493
CPM+A 5	13	45.5	84.9	93.4	114.0	115.0	98.8	112.5	75.6	43.2	26.7	23.8	25.8	859
CPM+A 6	13	61.5	112.3	118.6	124.2	126.2	131.1	141.2	130.2	65.7	47.7	35.4	38.0	1132
CPM+A 7	20	55.9	105.0	107.0	111.3	120.9	117.1	132.6	100.0	57.6	40.4	37.9	39.3	1025

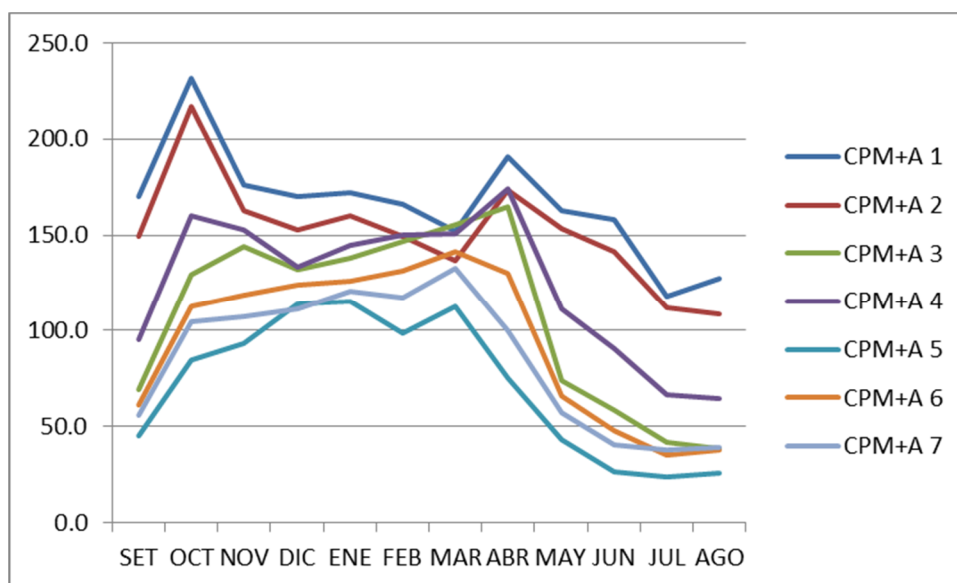


Figura 40. Regionalización de precipitación mensual obtenida mediante método Ward con serie medias mensuales y anuales 1970-2010.

Tabla 26. Precipitación media mensual (mm) para cada región obtenida por método Ward con serie medias mensuales y anuales, estandarizadas 1970-2010.

Grupo	Cant. estac	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
CPE 1	17	154.4	220.4	165.9	156.7	162.7	153.2	140.2	177.1	155.5	145.1	113.4	113.1	1858
CPE 2	13	63.7	128.6	149.5	141.8	150.6	154.0	166.3	169.1	68.4	50.9	33.1	34.8	1311
CPE 3	14	86.4	144.3	143.5	124.9	128.5	140.1	141.5	162.8	98.8	80.6	61.5	54.4	1367
CPE 4	22	53.2	102.3	113.6	124.7	128.4	125.8	146.6	116.7	53.0	35.5	26.0	29.1	1055
CPE 5	5	34.0	72.7	92.8	123.0	125.0	101.5	112.9	66.7	26.8	15.2	12.5	13.6	797
CPE 6	18	62.0	107.5	99.1	100.9	109.9	107.2	112.3	91.1	65.7	48.8	48.1	48.8	1001

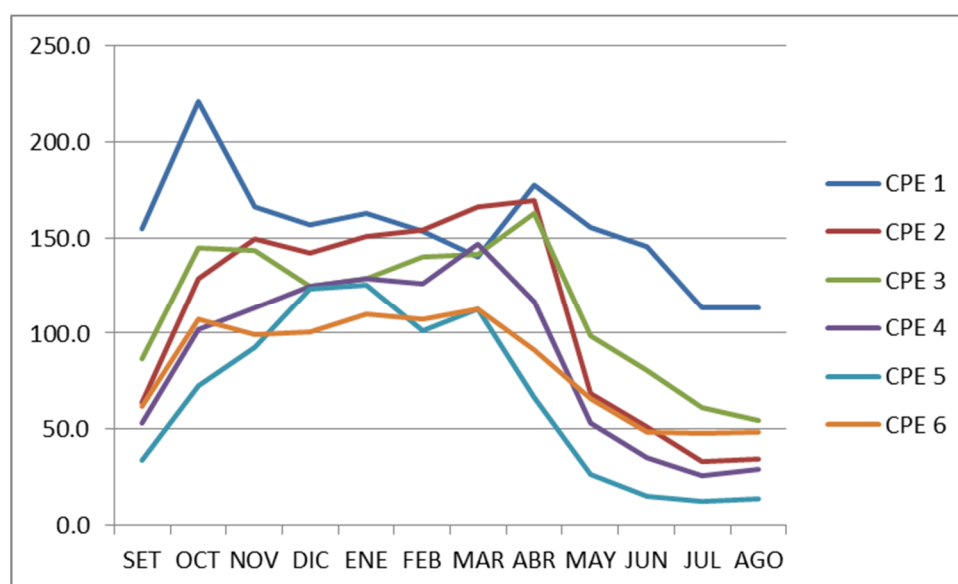


Figura 41. Regionalización de precipitación mensual obtenida mediante método Ward con serie medias mensuales y anuales, estandarizadas 1970-2010.

Para el caso de la regionalización utilizando los **L-momentos** se aplicó el programa ICI-RAFT (Giovannettone et al., 2013) a las series de precipitaciones mensuales desde setiembre de 1970 a agosto de 2010 de las 89 estaciones disponibles. Se detectó que cuatro estaciones (General Villegas INTA, San Miguel Aero, Puerto Bermejo y San Pedro) tenían un índice de discordancia mayor a tres, pero sin embargo no se la retiró del análisis porque habían sido consideradas en los otros métodos, y se intentaba no variar la muestra para no distorsionar la comparación de los resultados.

Para la determinación de las regiones homogéneas el programa requiere que se indique apriori la cantidad de grupos (regiones) a conformar. Para ello se utilizó el mismo número de grupos que los escogidos con el método de Ward y se los compararon.

También se probó modificar la cantidad de regiones, pero los resultados no fueron satisfactorios, por ejemplo si aumentaba en un grupo, se subdividía un grupo pequeño en dos grupos -más pequeños aún- lo que no convenía. Si en cambio se disminuía en un grupo, se agrupaba un grupo a otro, situaciones que son lógicas de comprender. Luego de varias pruebas por más o por menos cantidad de grupos se concluyó que el número óptimo era el que indicaban los clusters, es decir siete.

La Figura 42 ilustra la ubicación de los mismos, cada color corresponde a un grupo conformado. Por su parte la Tabla 27 muestra las características de los siete grupos, obtenidos con el programa ICI-RAFT, correspondiendo la nomenclatura de las versiones adimensionales de los L-momentos a las siguientes:

L1: factor de ubicación o media

L2: factor de escala

T1: L-CV: coeficiente de L-variabilidad

T3: L-Sk: coeficiente de L-asimetría

T4: L-Kurt: coeficiente de L-curtosis

H: Homogeneidad

Para la identificación de los grupos se usó la siguiente nomenclatura:

- LP: L-momentos precipitación mensual

Tabla 27. Características regionales obtenidas por L-momentos para la precipitación mensual.

Grupo	Cant. estac	L1	L2	T1	T3	T4	H
LP 1	10	1926.2	225.2	0.12	0.13	0.20	-0.87
LP 2	6	1507.1	212.5	0.14	0.14	0.13	-1.08
LP 3	21	1022.1	122.9	0.12	0.05	0.13	0.86
LP 4	12	850.3	101.3	0.12	0.07	0.16	0.37
LP 5	20	1298.7	188.7	0.15	0.12	0.16	-1.38
LP 6	7	1759.9	218.6	0.12	0.15	0.19	0.49
LP 7	13	1132.1	168.9	0.15	0.11	0.11	4.07

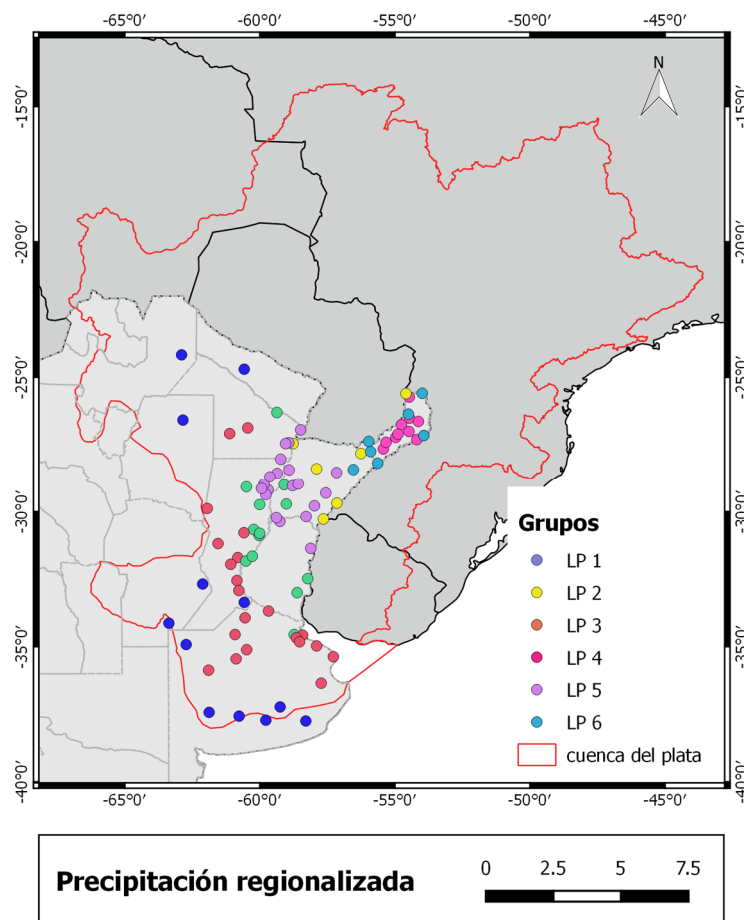


Figura 42. Regionalización de precipitación mensual obtenida mediante L- momentos con el modelo ICI-RAFT.

La Tabla 28 presenta los promedios mensuales de precipitación para cada región obtenida mediante el método de los L-momentos y la Figura 43 su representación mensual.

Tabla 28. Precipitación media mensual (mm) para cada región obtenida por L-momentos.

Grupo	Cant. estac	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
LP 1	10	160.9	228.8	173.1	162.9	168.1	155.6	144.7	178.1	162.8	153.7	118.6	118.8	1926
LP 2	6	100.0	164.8	150.5	130.8	140.9	149.4	146.8	172.6	115.8	95.2	72.0	68.3	1507
LP 3	21	55.2	103.8	106.9	112.7	121.6	117.4	133.7	99.9	56.5	39.5	36.8	38.1	1022
LP 4	12	45.7	85.2	92.5	111.8	113.3	96.7	108.8	73.7	44.0	27.2	24.6	26.7	850
LP 5	20	69.3	129.5	145.0	133.1	139.4	147.1	156.2	165.4	74.7	58.9	41.5	38.8	1299
LP 6	7	145.1	208.4	155.6	147.9	155.1	149.8	133.8	175.8	145.0	132.8	105.9	104.8	1760
LP 7	13	61.5	112.3	118.6	124.2	126.2	131.1	141.2	130.2	65.7	47.7	35.4	38.0	1132

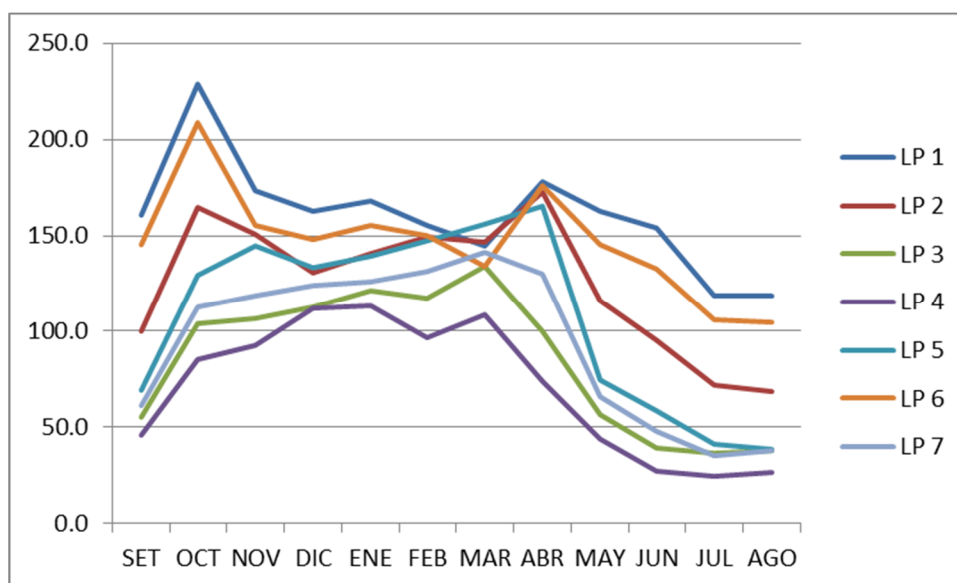


Figura 43. Promedio mensual de cada grupo obtenido con L-momentos.

Si se comparan las precipitaciones de los grupos en las Tablas 24, 25, 26 y 28, coincidentes con las Figuras 38, 39, 40 y 42, respectivamente, se observa que los valores obtenidos no difieren demasiado para cada mes, pudiéndose seleccionar indistintamente un método. Se selecciona por lo tanto las agrupaciones resultantes con los L-momentos para estimar la precipitación areal para cada subcuenca según técnica de regionalización.

Acordado que se van a utilizar los grupos resultantes de aplicar los L-momentos, entonces el valor mensual, de cada grupo correspondiente, reemplazará a los valores registrados en cada estación. Se pretende de este modo ver en qué medida el reemplazo del valor puntual por un valor regional resulta aceptable para la estimación de los caudales.

Para obtener la precipitación areal para cada subcuenca se usó el modelo CHAC ingresando un archivo LEMA, donde en cada estación el valor mensual coincidía con la media del grupo al que pertenece, el cual se pondera por los pesos obtenidos con los polígonos de Thiessen y presentados en la Tabla 19. La Tabla 29 muestra la precipitación areal obtenida para cada subcuenca de la margen izquierda del río Paraná en el período 1970-2010.

**Tabla 29. Precipitación mensual areal (mm) en cuencas margen izquierda del río Paraná.
Período 1970-71 al 2009-10. Método de regionalización por L-momentos.**

Río	Lugar	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Piray Mini	V. Hermoso	155	221	168	157	163	153	140	176	158	146	113	113	1863
Piray Guazú	Pinar Ciba	159	225	172	161	168	155	142	179	161	151	116	117	1906
Paranay	El Alcazar	151	218	164	154	160	151	138	174	155	142	110	110	1827
Santa Lucía	Santa Lucia	76	135	142	129	135	145	151	164	82	67	50	46	1322
Corrientes	Paso Lucero	91	148	143	125	130	143	144	168	98	85	67	58	1399
Batel	Paso Cerrito	86	142	142	123	129	143	145	168	93	80	62	54	1367
Corriente	Los Laureles	80	135	135	121	126	138	142	156	86	72	56	50	1298
Barrancas	P. La Llana	66	122	126	124	129	134	145	138	70	53	40	40	1187
Guayquiraró	Paso Juncué	74	135	144	132	139	147	155	166	80	65	48	44	1329
Feliciano	Paso Medina	69	131	146	136	144	150	160	166	74	57	40	39	1312
Nogoyá	Ruta Pcial 11	57	110	113	121	125	126	141	116	58	40	30	33	1069
Gualeguay	Ros. del Tala	69	120	121	114	120	126	134	134	73	58	46	43	1158

- Para la ETP

Para aplicar el método **Ward** de clusterización, se utilizó el programa PAST (Hammer et al., 2001). Se estimaron las medias mensuales de las ETP para cada estación, y con ellas se conformaron las series promedios mensuales, con tantos valores por mes como estaciones se utilizan. Los estadísticos de estas series se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30. Estadísticos de la ETP media mensual de la serie 1970-2010.

	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
N	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Min	56.7	81.9	105.7	125.1	128.6	111.3	88.3	56.4	33.8	22.7	24.8	38.9
Max	106.8	137.4	148.8	168.3	174.4	140.3	127.3	89.9	67.9	51.7	62.4	84.0
Media	79.1	108.1	130.9	153.1	158.0	125.6	109.6	72.7	50.2	36.4	41.6	59.4
Varianza	139.6	166.3	128.7	115.4	99.7	56.1	99.0	78.7	84.0	60.9	102.8	129.1
Desvío est.	11.8	12.9	11.3	10.7	10.0	7.5	9.9	8.9	9.2	7.8	10.1	11.4
Mediana	79.0	108.3	133.6	155.7	159.9	126.0	109.1	71.6	48.3	34.4	39.6	57.2
25 prcntil	72.5	100.3	127.3	147.2	154.0	120.7	102.9	66.6	43.7	30.7	33.9	51.9
75 prcntil	87.7	116.4	138.7	159.5	165.4	131.5	116.9	79.3	57.2	41.9	49.4	67.6
C. asimetría	-0.04	-0.05	-0.71	-1.10	-0.94	-0.23	-0.25	0.13	0.18	0.30	0.35	0.16
C curtosis	-0.14	-0.30	-0.10	0.64	1.04	-0.41	-0.57	-0.61	-0.65	-0.63	-0.67	-0.58
C. Variab.	0.15	0.12	0.09	0.07	0.06	0.06	0.09	0.12	0.18	0.22	0.24	0.19

De abril hasta agosto la asimetría es positiva con máximos que alcanzan los 0.30 en junio y julio. Los restantes meses tienen asimetría negativa con mínimos cercanos a -1. La curtosis es siempre negativa excepto para los meses de diciembre y enero, variando desde -0.67 a 1.04. Se percibe una variabilidad armoniosa mes a mes, con valores de van de 6 al 24.4%, resultando los mínimos coeficientes en verano y los máximos en invierno. Esto se debe a las características de regularidad que tiene la variable analizada, que al ser continua las variaciones son moderadas en lugar de bruscas.

Con igual criterio utilizado para la precipitación, se analizaron tres juegos de datos. Las series de ETP, conformadas por 37 estaciones, fueron las siguientes:

- Series de ETP medias para cada mes
- Series de ETP medias para cada mes incluida la anual
- Series de ETP medias para cada mes incluida la anual, estandarizados

A partir de los dendrogramas se define el nivel de corte a adoptar. Se optó por el criterio de dividir la varianza total (distancia) por la mitad. De ello resultan 4 grupos.

Las Figuras 44 a 46 muestran los dendrograma de las series de valores mensuales, la mensual con anual y la estandarizada de ETP, respectivamente.

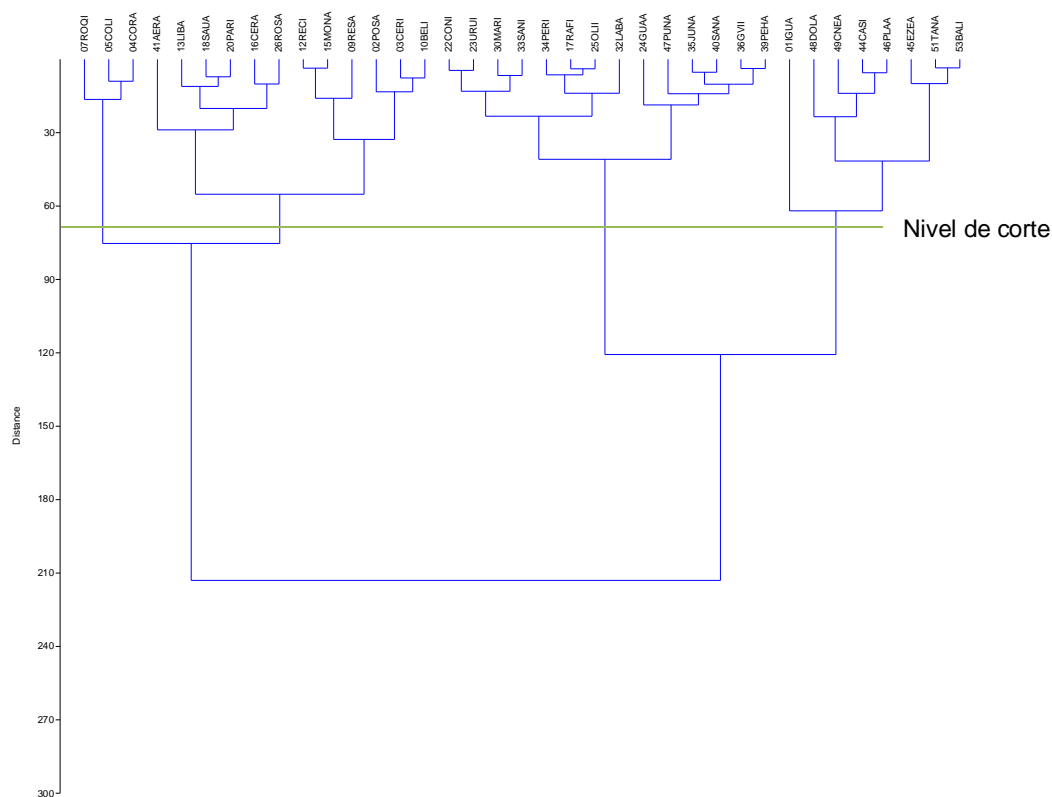


Figura 44. Dendrograma para la serie de ETP medias mensuales.

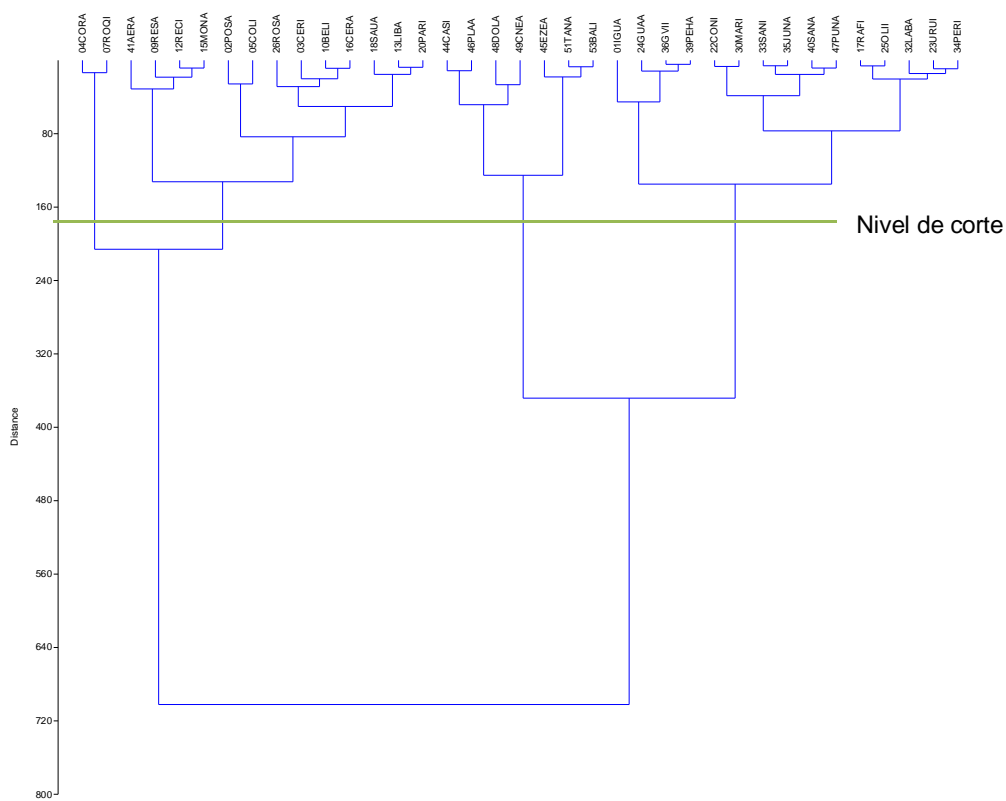


Figura 45. Dendrograma para la serie de ETP medias mensuales y anuales.

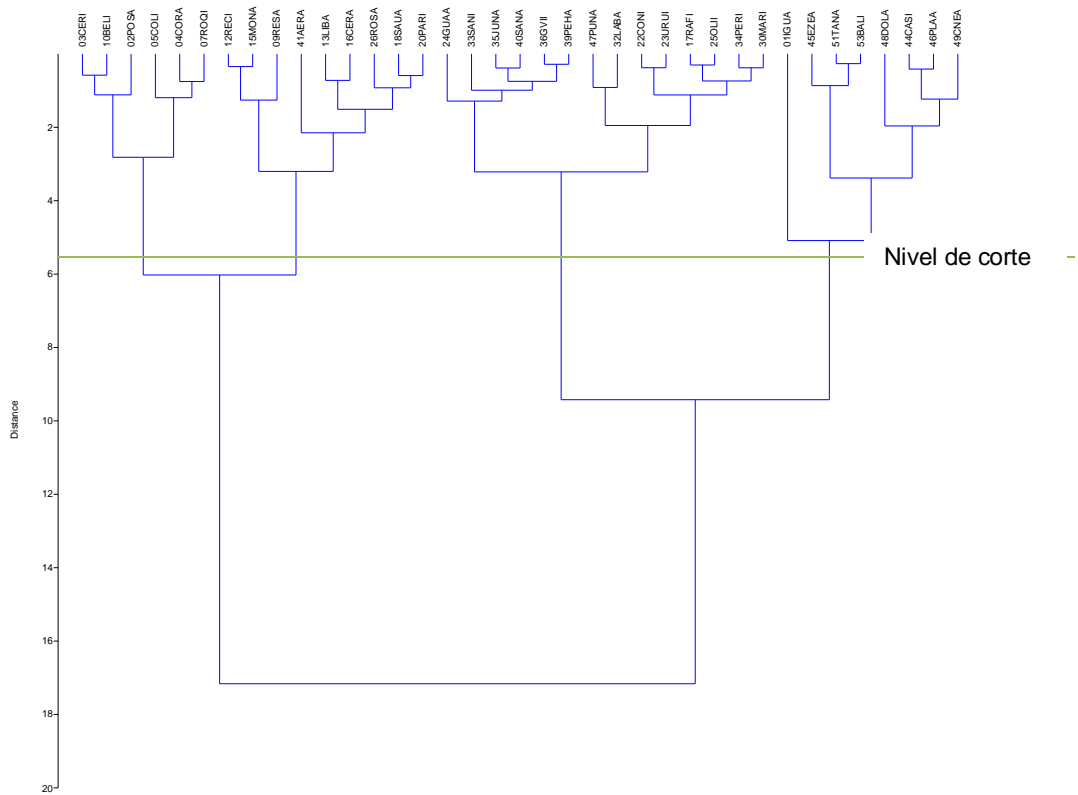


Figura 46. Dendrograma para la serie de ETP con valores estandarizados.

El comportamiento de la variable es muy homogéneo en toda la región, ello se traduce en que las regiones se definen con un nivel de corte que representa aproximadamente un 70 % de similitud.

Se establece que la cantidad de grupos resultantes según los niveles de corte analizados en las figuras sea de cuatro grupos, los que espacialmente representan adecuadamente la ETP mensual.

Para la estimación de la evapotranspiración potencial media areal aplicando los **L-Momentos**, se utilizó, al igual que con la precipitación, el programa ICI-RAFT (Giovannettone et al., 2013). Se conforma un archivo con datos de evapotranspiración potencial mensual del período 1970-2010, considerando las 37 estaciones climáticas. De este modo se cuenta con 12 valores por cada año de análisis para cada estación.

En la Figura 47 se aprecia la ubicación de las estaciones de ETP regionalizadas mediante el programa ICI-RAFT considerando los L-momentos. La cantidad de grupos conformados fue de 4 considerando la misma cantidad adoptada con los cluster. Cada color corresponde a un grupo.

La Tabla 31 muestra las características de los siete grupos, obtenidos con el programa ICI-RAFT, correspondiendo la nomenclatura de las versiones adimensionales de los L-momentos a las siguientes:

- L1: factor de ubicación o media
- L2: factor de escala
- T1: L-CV: coeficiente de L-variabilidad
- T3: L-Sk: coeficiente de L-asimetría
- T4: L-Kurt: coeficiente de L-curtosis
- H: Homogeneidad

Para la identificación de los grupos se usó la siguiente nomenclatura:

- LE: L-momentos evapotranspiración potencial mensual

Tabla 31. Características regionales obtenidas por L-momentos para la ETP mensual.

Grupo	Cant. estac	L1	L2	T1	T3	T4	H
LE 1	15	1095.6	35.9	0.03	0.09	0.13	6.00
LE 2	12	1210.9	38.0	0.03	0.05	0.14	1.35
LE 3	7	956.3	31.8	0.03	0.08	0.16	0.85
LE 4	3	1315.1	45.9	0.03	0.12	0.11	-0.35

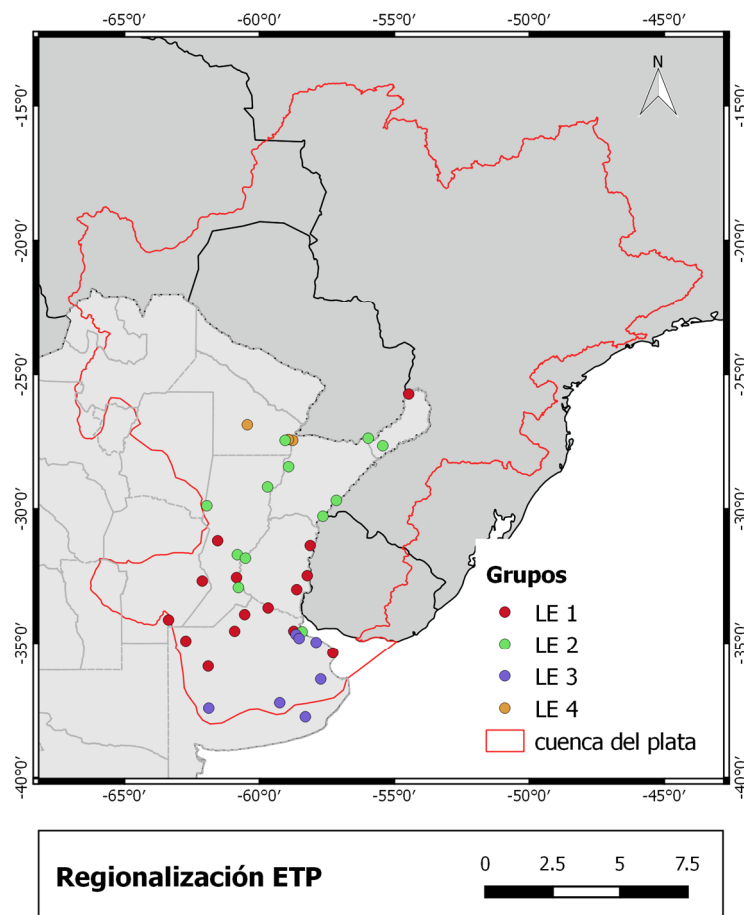


Figura 47. Regionalización de ETP mensual obtenida mediante modelo ICI-RAFT.

Los grupos obtenidos mediante el programa ICI-RAFT, son muy similares a los del Método Ward. Utilizando series mensuales, difieren en la estación Iguazú Aero, mientras que usando datos mensual y anual difieren en la estación El Colorado INTA y comparando con las estandarizadas hay mayores diferencias. Como conclusión la metodología de regionalización empleada para la ETP da resultados similares, y es indistinto adoptar cualquiera método. Se opta por utilizar el de los L-Momentos. Para cada grupo se estima mes a mes la ETP media y ese valor es asignado a cada estación en reemplazo de su valor mensual original.

La Tabla 32 presenta las ETP mensuales para los 4 grupos resultantes de aplicar los L-momentos.

Tabla 32. ETP media mensual (mm) para cada región obtenida por L-momentos.

Grupo	Cant. estac	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
1	15	76.4	105.0	130.6	153.6	157.7	123.4	106.8	69.8	46.6	33.0	37.5	55.6	1096
2	12	87.5	117.4	138.5	158.5	162.8	131.1	117.5	79.9	57.6	42.7	49.4	68.0	1211
3	7	61.5	88.8	112.3	137.9	145.9	115.5	95.0	60.6	38.4	27.0	29.4	44.0	956
4	3	100.6	130.9	145.1	165.0	168.4	138.3	125.8	86.9	65.8	49.6	59.5	79.3	1315

Luego para la determinación de la evapotranspiración media areal en cada subcuenca, se usó el modelo CHAC ingresando un archivo LEMA de ETP donde cada estación presentaba las medias mensuales de su región correspondiente. Este archivo era ponderado por los pesos obtenidos con los polígonos de Thiessen según la distribución de las 38 estaciones, y presentados en la Tabla 20. La Tabla 33 muestra la ETP areal para cada subcuenca margen izquierda del río Paraná en el período 1970-2010.

Tabla 33. ETP mensual areal (mm) en cuencas margen izquierda del río Paraná. Período 1970-71 al 2009-10. Método de regionalización por L-momentos.

Río	Lugar	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Piray Mini	V. Hermoso	76	105	131	154	158	123	107	70	47	33	38	56	91
Piray Guazú	Pinar Ciba	76	105	131	154	158	123	107	70	47	33	38	56	91
Paranay	El Alcazar	82	111	135	156	160	127	112	75	52	38	43	62	96
Santa Lucía	Santa Lucia	92	122	141	161	165	134	120	82	60	45	53	72	104
Corrientes	Paso Lucero	88	118	139	159	163	131	118	80	58	43	50	68	101
Batel	Paso Cerrito	89	119	139	159	163	132	118	81	58	43	50	69	102
Corriente	Los Laureles	87	116	137	157	161	130	116	79	57	42	49	67	100
Barrancas	P. La Llana	88	117	139	159	163	131	118	80	58	43	49	68	101
Guayquiraró	Paso Juncué	86	116	138	158	162	130	116	79	56	41	48	66	100
Feliciano	Paso Medina	79	108	132	155	159	125	109	72	49	35	40	58	93
Nogoyá	Ruta Pcial 11	87	117	139	160	164	132	117	80	57	42	49	67	101
Guauguay	Ros. del Tala	79	108	133	155	159	125	110	72	50	36	41	59	94

4.1.3. MÉTODO DE KRIGING

El procedimiento práctico del método de kriging se inicia ajustando un variograma a la muestra, en este caso a datos de precipitación y ETP medios mensual para la serie de 1970-2010 de todas las estaciones disponibles, luego se traza una grilla a partir del variograma obtenido y finalmente se confeccionan los mapas con las isolíneas, en este caso isohieta e isolíneas de ETP, con una equidistancia preestablecida.

Todo el procedimiento puede realizarse mediante programas que aplican técnicas de geoestadísticas, como por ejemplo el SURFER o el ArcGIS.

En relación a la confección de los variogramas, el primer paso es extraerle la tendencia regional a la muestra, para no tener en cuenta esos puntos en el ajuste del variograma, luego se testean los modelos teóricos de mejor ajuste a los puntos muestrales y que será el utilizado para la confección de la grilla.

La grilla es obtenida por interpolación a partir del variograma ajustado. Los puntos de la grilla poseen valores en tres coordenadas, en este caso serán la latitud, longitud y valor de la variable (P o ETP). Los puntos pueden estar en separaciones regulares y no necesariamente coincidentes con la ubicación de las estaciones. También es posible a partir de la grilla rasterizar el área, ya que cada punto de la grilla representa en el espacio, un valor de la variable.

La cantidad de puntos recomendables para la grilla debe estar en consonancia con la distancia entre las estaciones, ya que una malla más o menos densa, se realiza a partir de la misma información de base, no resultando mejores resultados por disponer de más puntos en la grilla.

Luego a partir de esa grilla de valores de precipitación es posible trazar curvas de iguales valor de la variable (P o ETP). Se requiere para esto indicarle al programa, hasta donde tiene que considerar la información de los puntos (radius), esto está en relación con el alcance que se determinó en el variograma según la muestra, pues este parámetro del variograma indica la distancia máxima en la cual existe relación espacial entre los datos.

- Para la precipitación

Se aplicó el Programa SURFER v. 8.05 (© Golden Software Inc, 2007) a la precipitación media mensual de cada estación para la serie 1970-2010, obteniéndose 12 grillas mensuales, donde los puntos representan en el espacio la precipitación media del mes para toda la serie. La Tabla 34 presenta los parámetros de los variogramas ajustados gráficamente a las muestras de precipitación para cada mes, adoptando para todos los meses el modelo Gaussiano. A modo de ejemplo, la Figura 48 presenta el variograma ajustado a la muestra para el mes de

setiembre, obtenido mediante el programa SURFER, las medidas del eje de ordenadas son en mm^2 y la distancia en el eje de abscisas en grados.

**Tabla 34. Parámetros de ajuste a los variogramas para las precipitaciones mensuales.
Series 1970-2010.**

Caracte- rísticas	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Tendencia	si	si	no	no	no	no	no	no	si	si	si	si
Modelo	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss
Pepita	50	110	80	110	80	90	110	100	50	65	50	50
Meseta	180	290	450	290	290	320	270	1300	110	75	7.5	75
Alcance	2.3	2.5	3.0	3.2	2.5	3.0	2.5	3.5	2.3	2.3	2.0	2.3

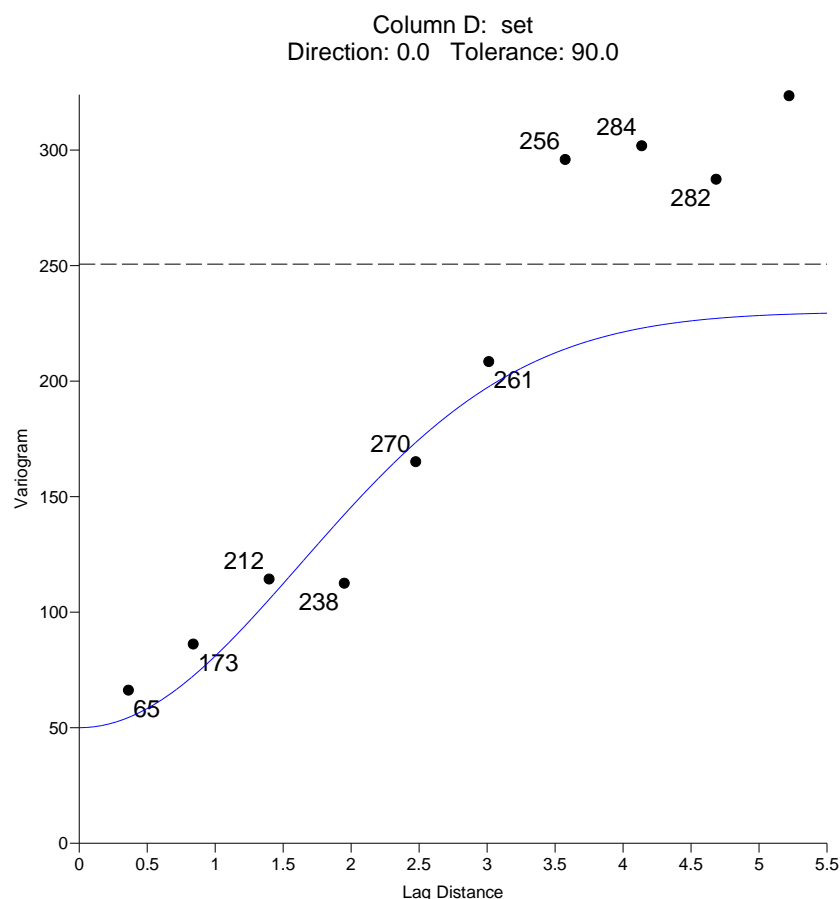


Figura 48. Ajuste del variograma para la precipitación del mes de setiembre.

Los variogramas del modelo Gaussiano señalan que el fenómeno evaluado, en este caso precipitación mensual, tiene un comportamiento de poca variación en los puntos cercanos y una variación suavemente creciente a medida que la distancia aumenta. El fenómeno de la

lluvia cumple este comportamiento, por eso es correcto que éste sea el modelo que ajuste a los datos.

Para cada mes, según el variograma correspondiente, se construyeron las grillas: en el caso de este trabajo, en lugar de trazado de mapas, se optó por rasterizar el área y tener un campo de precipitación en el espacio.

Para la determinación de la precipitación de las cuencas, o también denominada Precipitación Areal, se recortaron las grillas con los contornos de las mismas, luego se calculó la precipitación media con los valores de los puntos dentro de los límites (Figuras 49 y 50). Se repite esta operación para los doce meses en todas las cuencas y de ese modo se conforma el archivo de precipitación media areal que se utiliza en el programa CHAC. Se recurrió al software “QGis” versión 2.18 (<http://qgis.osgeo.org>) para realizar esta tarea. Este programa es de uso libre y gratuito.

La Tabla 35 presenta los valores de precipitación mensual media areal para las 12 subcuencas de la margen izquierda del río Paraná en el período 1970-2010.

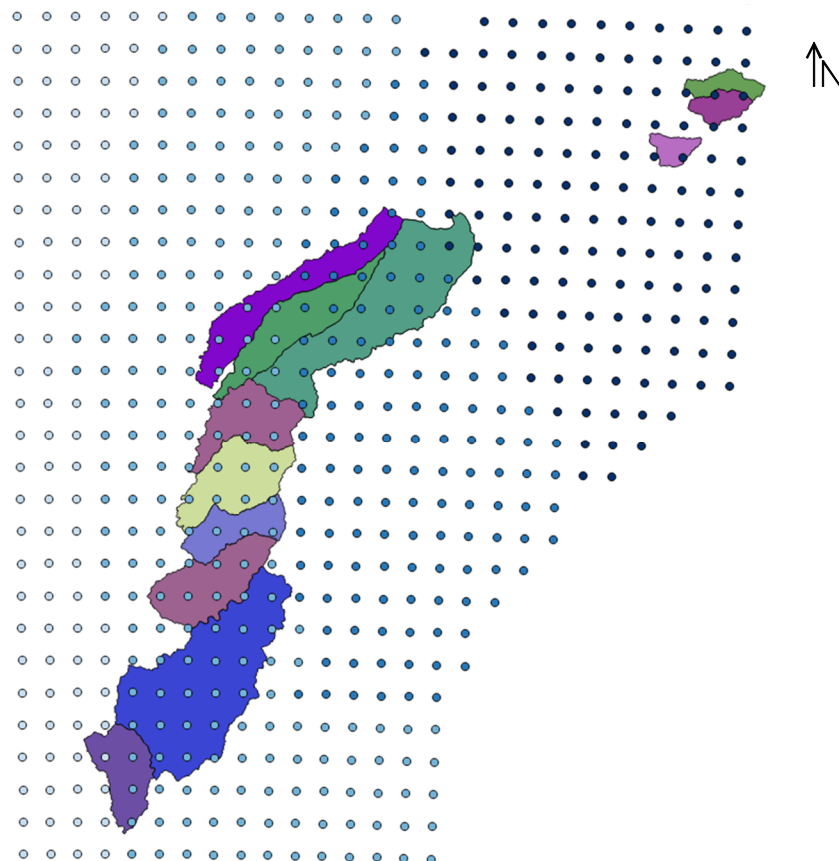


Figura 49. Ejemplo de grilla y cuencas superpuestas.



Figura 50. Ejemplo de recorte de la grilla rasterizada del mes de junio y la cuenca de río Gualeguay.

Tabla 35. Precipitación mensual media areal (mm) en cuencas margen izquierda del río Paraná. Período 1970-71 al 2009-10. Método de Kriging.

Río	Lugar	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Piray Miní	V. Hermoso	134.1	195.7	153.3	151.6	156.6	145.9	123.3	156.5	152.6	132.6	97.1	103.3	1703
Piray Guazú	Pinar Ciba	137.0	198.8	153.5	152.2	156.5	146.7	125.8	158.9	152.3	134.7	100.5	105.2	1722
Paranay	El Alcazar	137.4	199.9	154.8	152.9	157.0	147.4	130.4	165.7	145.4	133.7	102.8	103.7	1731
Santa Lucía	Santa Lucia	71.4	133.5	140.9	132.3	135.6	140.2	140.9	165.4	82.5	69.4	50.7	48.8	1312
Corrientes	Paso Lucero	86.5	146.9	139.5	131.3	131.3	139.3	135.2	169.1	95.5	82.3	66.8	61.0	1385
Batel	Paso Cerrito	72.5	132.7	140.1	130.0	132.1	140.0	139.6	166.0	83.2	69.9	51.7	48.9	1307
Corriente	Los Laureles	79.5	138.2	138.1	130.2	131.3	139.6	137.2	166.0	88.9	76.9	58.8	54.4	1339
Barrancas	P. La Llana	67.2	119.4	127.1	126.4	130.5	136.5	140.3	152.8	76.4	59.8	43.3	41.6	1221
Guayquiraró	Paso Juncué	68.2	118.6	124.9	125.4	130.9	134.1	141.0	149.5	77.5	59.7	43.6	42.4	1215
Feliciano	Paso Medina	66.6	114.6	122.2	125.3	129.6	131.4	140.6	143.1	75.1	56.4	40.8	41.3	1187
Nogoyá	Ruta Pcial 11	58.4	107.9	110.8	121.5	117.4	122.6	136.3	112.2	62.0	44.2	34.8	38.2	1066
Gualeguay	Ros. del Tala	68.5	111.5	118.4	123.7	124.4	127.2	137.1	130.6	73.1	54.3	41.4	42.2	1152

- Para la ETP

El mismo procedimiento se realiza para obtener la evapotranspiración potencial media areal en cada subcuenca para cada mes. Para los caso de las ETP el ajuste se logró con un modelo lineal para todos los variogramas. Este modelo sugiere la fuerte influencia de a variación regional de la temperatura en la estimación de la ETP, que se manifiesta con la función lineal representando la tendencia o deriva regional. La Figura 51 presenta el variograma ajustado para el mes de setiembre mediante el programa Surfer, las medidas del eje de ordenadas son en mm^2 y la distancia en el eje de abscisas en km.

La Tabla 36 muestra los parámetros adoptados para los variogramas que se usan en la confección de las grillas. Mientras que la Tabla 37 presenta los valores de evapotranspiración mensual media areal para las 12 subcuencas de la margen izquierda del río Paraná en el período 1970-2010.

Tabla 36. Parámetros de ajuste a los variogramas para las ETP mensuales. Series 1970-2010.

Caracte- rísticas	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Modelo	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal
Pepita	1.6	0	4.5	0	13.1	10.6	25.8	7.4	8.1	8.2	7.0	9.6
Varianza (mm²)	135.8	161.8	125.2	112.3	96.9	54.7	96.4	76.6	81.6	59.4	99.9	125.5

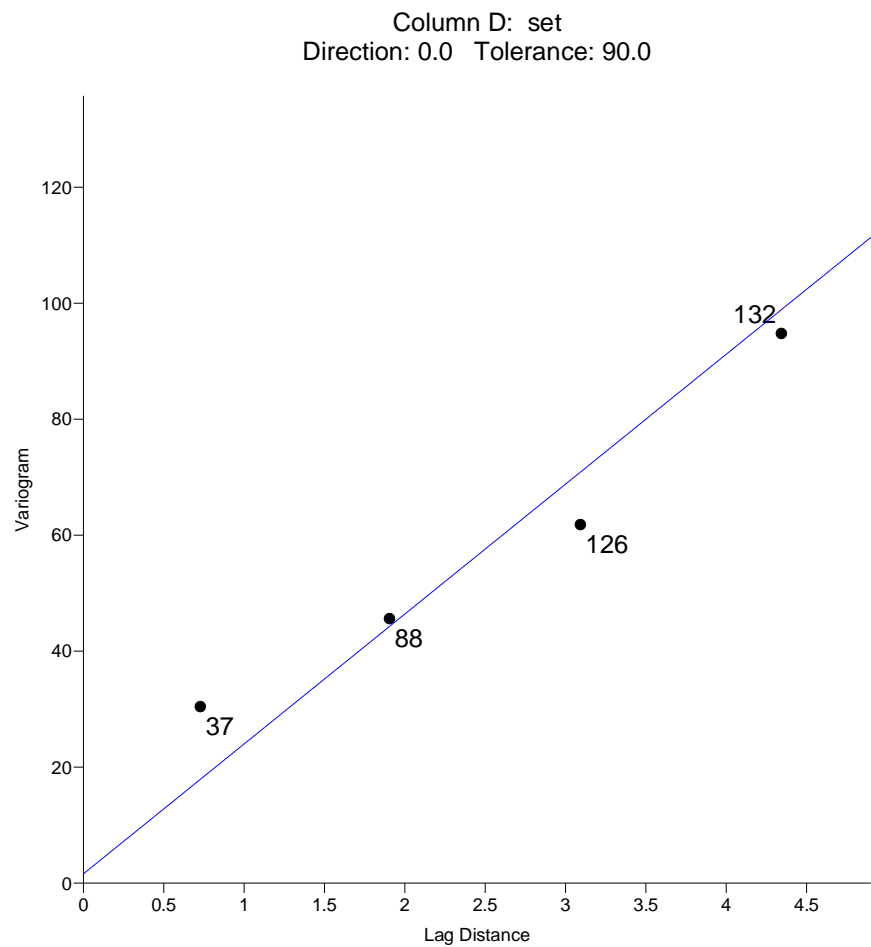


Figura 51. Ajuste del variograma para la ETP del mes de setiembre.

Tabla 37. Evapotranspiración potencial media areal (mm) en cuencas margen izquierda del río Paraná. Período 1970-71 al 2009-10. Método de Kriging.

Río	Lugar	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Piray Mini	V. Hermoso	78.7	104.3	121.2	132.8	137.6	118.6	112.5	80.7	57.7	44.0	51.7	68.0	1108
Piray Guazú	Pinar Ciba	79.6	106.5	122.2	132.9	137.7	118.6	113.1	80.8	58.1	44.0	52.0	68.0	1113
Paranay	El Alcazar	81.6	108.1	125.8	140.4	143.2	121.6	114.3	82.2	59.0	44.8	52.7	69.3	1143
Santa Lucía	Santa Lucia	92.3	122.3	139.5	160.7	161.8	132.1	119.8	83.6	61.8	46.0	54.5	72.9	1247
Corrientes	Paso Lucero	91.1	121.0	139.1	160.1	160.9	131.3	119.1	84.3	61.7	46.0	54.6	72.8	1242
Batel	Paso Cerrito	91.6	121.7	139.4	161.0	162.2	131.9	119.5	83.1	61.2	45.5	53.8	72.2	1243
Corriente	Los Laureles	90.6	120.5	138.7	160.0	161.4	131.3	119.0	83.1	60.8	45.3	53.5	71.8	1236
Barrancas	P. La Llana	85.7	115.6	135.8	157.7	162.3	129.6	116.7	77.9	54.2	41.2	47.8	66.3	1191
Guayquiraró	Paso Juncué	84.2	114.0	135.0	157.1	162.5	128.8	115.8	76.6	55.8	39.8	46.0	64.5	1180
Feliciano	Paso Medina	82.6	112.6	134.6	157.0	162.9	128.4	115.0	75.5	53.0	38.7	44.5	62.9	1168
Nogoyá	Ruta Pcial 11	81.4	111.4	136.7	158.7	164.1	127.5	111.9	73.6	51.0	36.6	42.0	60.3	1155
Gualeguay	Ros. del Tala	80.1	109.9	134.0	156.7	163.2	127.1	113.0	73.8	51.0	36.8	42.1	60.1	1148

4.2. BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL EN LAS SUBCUENCAS ARGENTINAS DE CUENCA DEL PLATA

Uno de los objetivos del cálculo del Balance Hídrico Superficial de la Cuenca del Plata, llevado a cabo para el Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata en relación con los efectos de variabilidad y cambio climático dentro del Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos fue el de disponer del Balance seriado mes a mes del período 1970/71-2009/10 (Hämmerly et al., 2014).

Con el Programa CHAC se calcularon la precipitación y la evapotranspiración media areal, por el método de Thiessen, para cada subcuenca aforada, y se simularon los caudales de escurrimiento superficial. Se usaron dos tercios de las series disponibles para la calibración del modelo y el tercio restante para su verificación. Adicionalmente se calcularon las curvas de duración de caudales en las subcuencas. El mismo procedimiento se extendió a cuencas sin registros de caudales con la finalidad de determinar su producción hídrica.

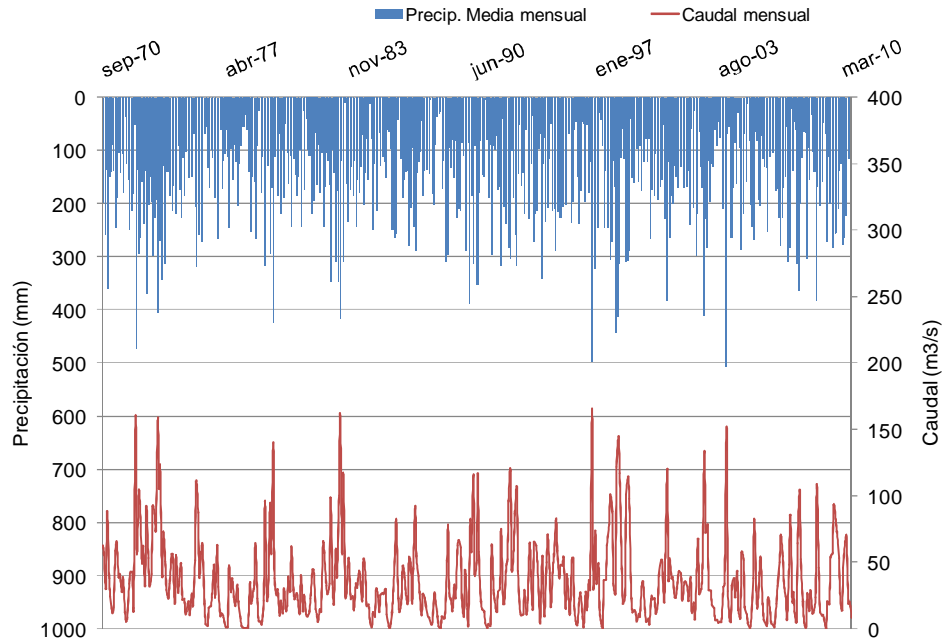
En total se modelaron y calibraron, mediante el software CHAC, a paso de tiempo mensual, una cuenca sobre la margen derecha del río Paraguay, 17 cuencas en la margen derecha del Paraná, 12 en la margen izquierda del río Paraná y 6 en la margen derecha del río Uruguay. En todas ellas se ajustaron las calibraciones con el criterio que el error con respecto al volumen sea menor al 10%. Condición que se pudo cumplir en la mayoría de los casos.

Los parámetros obtenidos por medio de esta calibración son los empleados para las sucesivas corridas del modelo con los diferentes campos de precipitación y de evapotranspiración potencial areales obtenidos de regionalización y de krigeado.

4.2.1. APLICACIÓN DEL MODELO CHAC

Se presenta la modelación sólo de las cuencas aforadas que aportan de la margen izquierda del río Paraná, extraída del Informe “Balance hídrico superficial de la Cuenca del Plata en territorio argentino” que como se explicó anteriormente los campos areales se determinaron en base al método de Thiessen.

La Figura 52 resume la información de base para la calibración en la cuenca del Aº Piray Miní. Figuras similares para las restantes cuencas se encuentran en el Anexo III



**Figura 52. Precipitación areal y caudales mensuales en la cuenca del Aº Piray Miní.
Período 1970/71-2009/10.**

Como resultado de la calibración se presenta en la Tabla 38 los parámetros obtenidos en las calibraciones y sus correspondientes verificaciones en los periodos indicados. Junto con los parámetros se muestran los errores en el período de calibración y de validación.

Las nomenclaturas utilizadas en las tablas corresponden a:

En relación a los parámetros de calibración:

CETP: Coeficiente corrector de la **ETP** (Evapotranspiración Potencial);

C: parámetro de excedencia; **Hmax:** Capacidad Máxima de Almacenamiento en el Suelo;

Imax: Infiltración Máxima en el Suelo;

$\alpha 1, 2$: coeficientes de descargas de la primera y segunda rama del acuífero;

Qsub: Caudal Subterráneo al inicio del período de simulación;

Ho: Humedad inicial del suelo al inicio de la simulación.

En relación a los errores:

Emed: Error medio relativo;

Esmr: Error cuadrático-estandarizado medio relativo al caudal medio registrado;

Esmrl: Error cuadrático-estandarizado medio, relativo a cada caudal registrado;

R: Correlación entre los valores históricos registrados y los simulados por el modelo.

Los resultados de la calibración se sintetizaron en tablas con los valores medios mensuales y anuales de las variables del balance hídrico superficial en las cuencas y subcuencas, del periodo 1970/71 - 2009/10.

A modo de ejemplo se presenta la Tabla 39 para la cuenca del río Gualeguay, las restantes tablas se presentan en el Anexo IV.

Tabla 38. Parámetros de calibración por subcuenca. Margen Izquierda del río Paraná.

		Datos de entrada del Modelo				Parámetros de Calibración del modelo						Errores - Calibración						Errores - Verificación		
Río	Lugar	Área (km ²)	Código Q _{cal}	Periodo calibración		C _{ETP}	C	H _{MAX}	I _{MAX}	α ₁	α ₂	Emr	Esmrl	Esmr	R	Periodo verificación		Emr	Esmrl	Esmr
				Inicial	Final											Inicial	Final			
Piray Miní	V. Hermoso	1220	Q01VHE	1970/71	1995/96	1	0.25	225	100	0.1	0.10	0.13	2.4	0.7	0.8	1996/97	2009/10	0.17	0.6	3.1
Piray Guazú	Pinar Ciba	1316	Q02CIB	1970/71	1995/96	1.2	0.35	230	100	0.1	0.01	0.09	1.9	0.7	0.81	1996/97	2009/10	0.21	0.6	1.9
Paranay	El Alcázar	979	Q03ALC	1972/73	1995/96	1	0.35	250	100	0.04	0.03	0.11	1.4	0.5	0.85	1996/97	2009/10	-0.10	0.5	0.8
Santa Lucía	Santa Lucia	6521	Q04STA	1975/76	1995/96	1	0.45	200	100	0.018	0.01	-0	1.6	0.9	0.74	1996/97	2009/10	0.09	1.1	1.6
Corriente	Paso Lucero	13001	Q05PLU	1970/71	1995/96	1	0.30	160	100	0.100	0.01	-0.1	1.6	0.9	0.55	1996/97	2009/10	0.02	1.1	1.9
Batel	Paso Cerrito	5592	Q06PCE	1987/88	2000/01	1	0.40	260	100	0.01	0.001	0.08	5.1	1.5	0.61	2000/01	2009/10	0.80	2.5	358
Corriente	Los Laureles	23074	Q07LAU	1991/92	2002/03	1	0.35	250	100	0.016	0.07	0.12	0.80	0.80	0.71	2003/04	2009/10	-0.03	0.3	0.5
Barrancas	Paso La Llana	5520	Q08LLA	1975/76	1995/96	1	0.30	170	100	0.045	0.01	-0.1	75.4	1	0.72	1996/97	2009/10	0.00	1.2	92.5
Guayquiraró	Paso Juncué	3130	Q09JUN	1975/76	1995/96	1	0.35	210	100	0.034	0.03	0.05	88	1	0.83	1996/97	2009/10	0.22	0.9	14.8
Feliciano	Paso Medina	5545	Q10MED	1975/76	1995/96	1	0.35	200	90	0.105	0.05	0.09	5.9	1.1	0.77	1996/97	2009/10	0.00	1.0	4.7
Nogoyá	Ruta Pcial 11	3889	Q11NOG	1984/85	2000/01	1	0.35	200	100	0.100	0.01	-0.1	2.4	2	0.5	2000/01	2009/10	0.05	0.8	1.4
Gualeguay	R. del Tala	15975	Q12TAL	1992/93	2000/05/06	1	0.35	220	90	0.057	0.01	-0	134	1	0.77	2006/07	2009/10	0.03	0.7	2.7

Tabla 39. Variables del balance hídrico superficial en área con aforo. Período 1971/71-2009/10.

Código	Río	Est. Hidro.	Area (km ²)	Variable	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Total / Mód. Anual
Q12TAL	Río Gualeguay	Rosario del Tala	15975	Prec (mm)	76.7	118.9	128.7	127.4	124.1	132.3	148.5	132.5	81.9	60.5	43.8	45.1	1220
				ETP (mm)	77.9	107.3	130.7	154.0	160.3	124.6	111.9	72.8	49.6	35.6	40.5	58.0	1123
				ETR (mm)	71.4	101.8	116.0	126.3	115.8	96.2	101.4	69.6	46.8	34.3	38.5	53.4	971
				Escorr (mm)	12.5	18.6	23.1	23.1	20.0	24.6	28.0	31.0	28.1	19.5	12.9	9.8	251
				Q _{obs} (m ³ /s)	76.8	111.1	142.3	137.5	119.3	162.2	166.9	190.9	167.5	120.2	77.1	58.5	127.5
				q _{esp} (lts/s km ²)	4.8	7.0	8.9	8.6	7.5	10.2	10.4	12.0	10.5	7.5	4.8	3.7	8.0
				Aport.total (Hm3)	199.1	297.6	368.9	368.3	319.4	392.3	447.0	494.9	448.7	311.6	206.5	156.8	4011

Asimismo se graficaron las calibraciones y las simulaciones para todas las cuencas representándose los caudales simulados en líneas de trazo azul y los caudales observados en líneas de color morado.

Las simulaciones se realizaron para el período 1970-71 al 2009-10. Finalmente, a partir de los escurrimientos mensuales simulados se confeccionaron las curvas de duraciones correspondientes. Esta curva es de utilidad para la planificación de diferentes usos, observándose el tiempo promedio en el cual estarán disponibles escurrimientos superiores a los porcentajes requeridos.

A modo de ejemplo se presenta el caso del río Gualeguay en las Figuras 53 a 56.

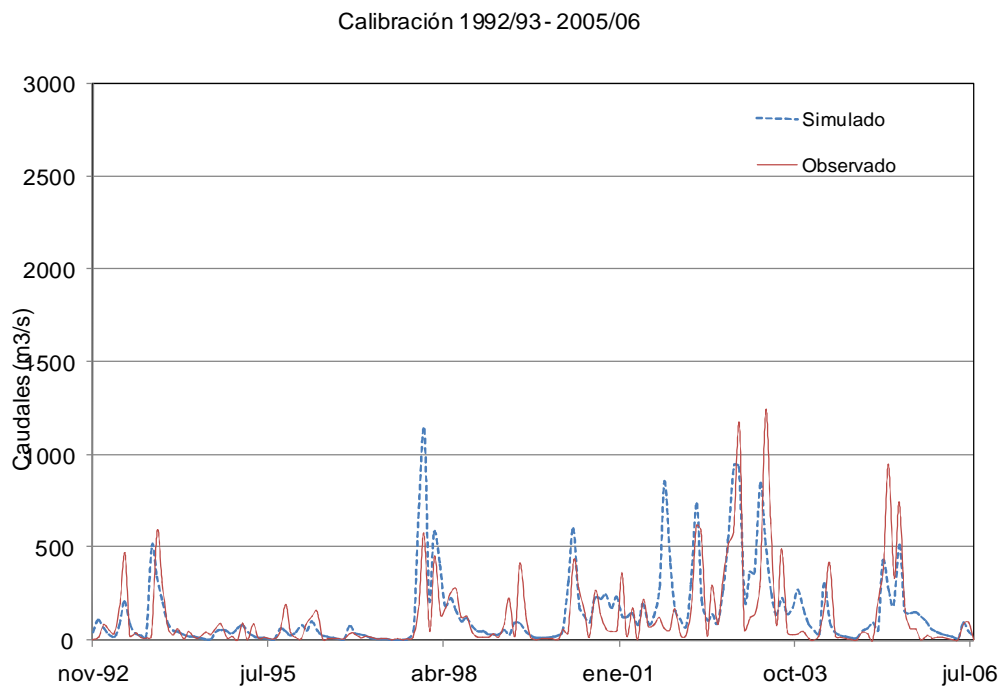


Figura 53. Caudales mensuales simulados y observados en la cuenca del río Gualeguay en la sección de Rosario del Tala. Período de Calibración.

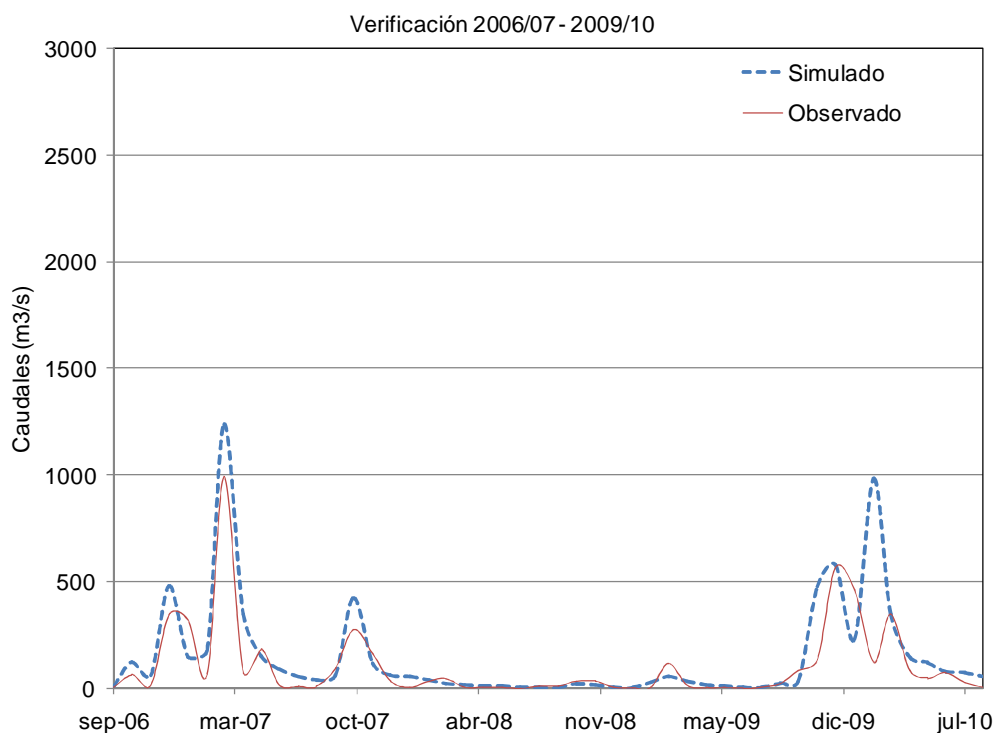


Figura 54. Caudales mensuales simulados y observados en la cuenca del río Gualeguay en la sección de Rosario del Tala. Período de Verificación.

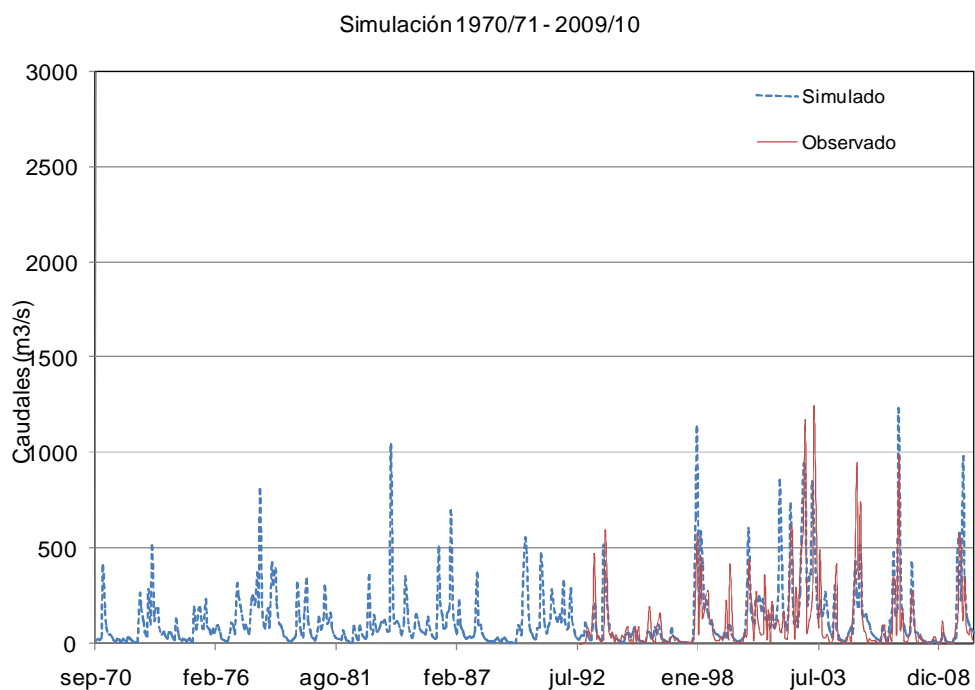


Figura 55. Caudales mensuales simulados y observados en la cuenca del río Gualeguay en la sección de Rosario del Tala. Período 1970/71-2009/10.

Gualeguay, Rosario del Tala

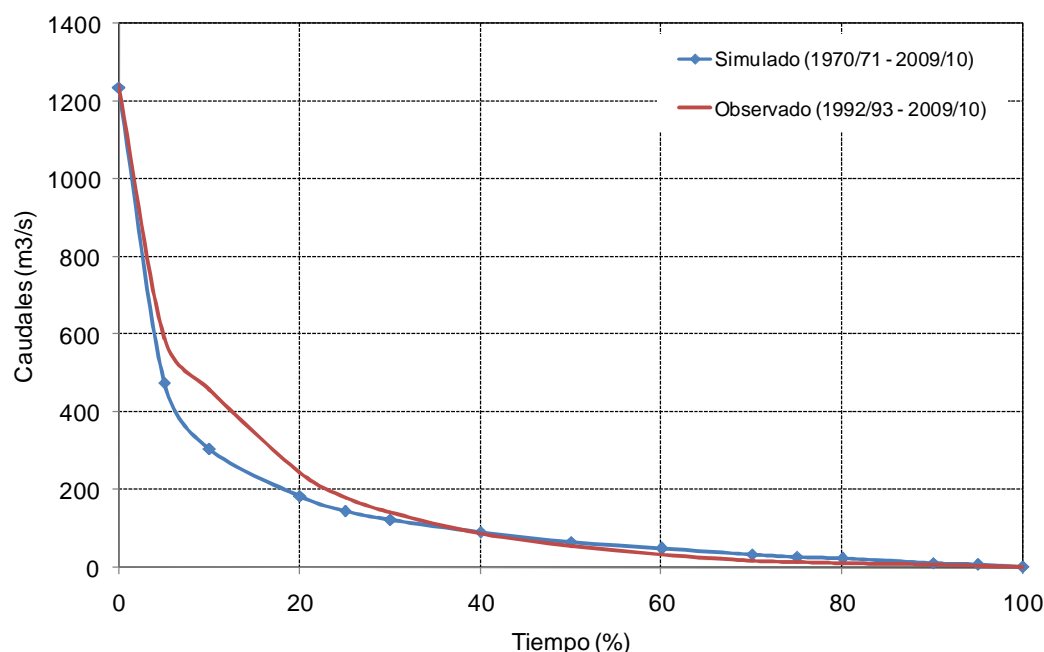


Figura 56. Curva de duración de caudales en la cuenca del río Gualeguay en la sección de Rosario del Tala. Período 1970/71-2009/10.

4.2.2. COMPARACIÓN DE MODELACIONES

Los hidrogramas resultantes de correr el programa CHAC utilizando los campos de precipitación y de ETP media areal obtenidos por medio de los tres métodos anteriormente presentados para las cuencas de la margen izquierda del río Paraná se contrastan con los hidrogramas observados.

Cabe recordar que para la modelación con Thiessen, se emplearon las series de tiempo desde setiembre de 1970 a agosto 2010 de la precipitación y de la ETP areales y se presentan en las figuras siguientes los caudales promedios mensuales de los datos simulados. En cambio los hidrogramas utilizando los campos de precipitación y de ETP media areal obtenidos por métodos de regionalización y kriging, muestran los valores ya promediados y que se obtienen directamente de la simulación.

Los caudales simulados y observados medios mensuales del periodo 1970-2010, para las 12 cuencas aforadas de la margen izquierda del río Paraná se muestran en las Figuras 57 a 68.

En ellas se puede apreciar los caudales obtenidos mediante el uso de Thiessen en la precipitación y la ETP areal reproducen el comportamiento de los caudales medios mensuales observados, y los valores simulados son aceptables en la mayoría de las cuencas. En cambio los caudales obtenidos mediante el uso de la regionalización y el kriging en los campos de precipitación y de ETP, representan el comportamiento de los caudales, incluso en algunos casos mejor, pero no así las cantidades, que son claramente inferiores a los valores registrados, esto se debe a que la regionalización se hizo con valores medios.

Se puede concluir por lo tanto, que todos los métodos empleados reflejan el comportamiento del caudal, sin embargo las modelaciones deben hacerse para series de tiempo a paso de tiempo mensual, y luego promediarse. No es correcto resumir los valores de precipitación o ETP en promedios mensuales y con ellos modelar.

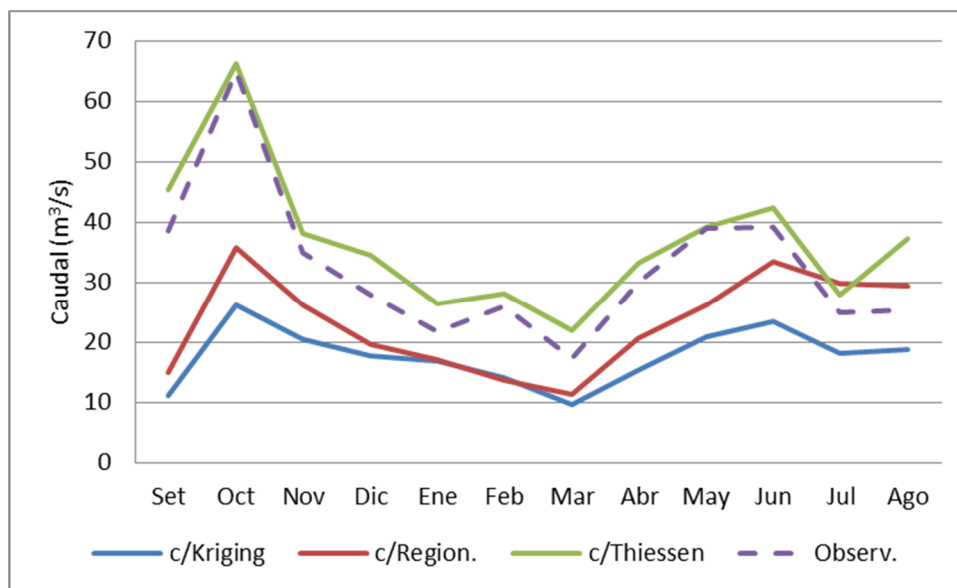


Figura 57. Hidrogramas A° Piray Mini en Valle Hermoso.

En los hidrogramas del A° Piray Miní, los tres métodos reproducen la forma del hidrograma observado, excepto en el mes de agosto para el método de Thiessen. No obstante los restantes meses reproduce muy bien los máximos y los mínimos.

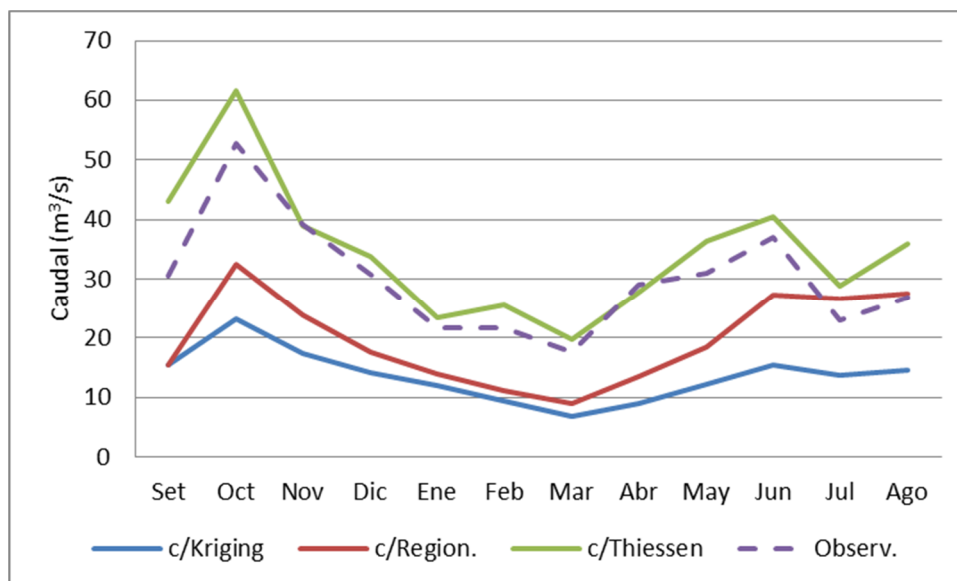


Figura 58. Hidrogramas A° Piray Guazú en Pinar Ciba.

En los hidrogramas del A° Piray Guazú, los tres métodos reproducen la forma del hidrograma observado, pero el que mejor se comporta es hidrograma obtenido usando el método de Thiessen, copiando muy bien los máximos y los mínimos.

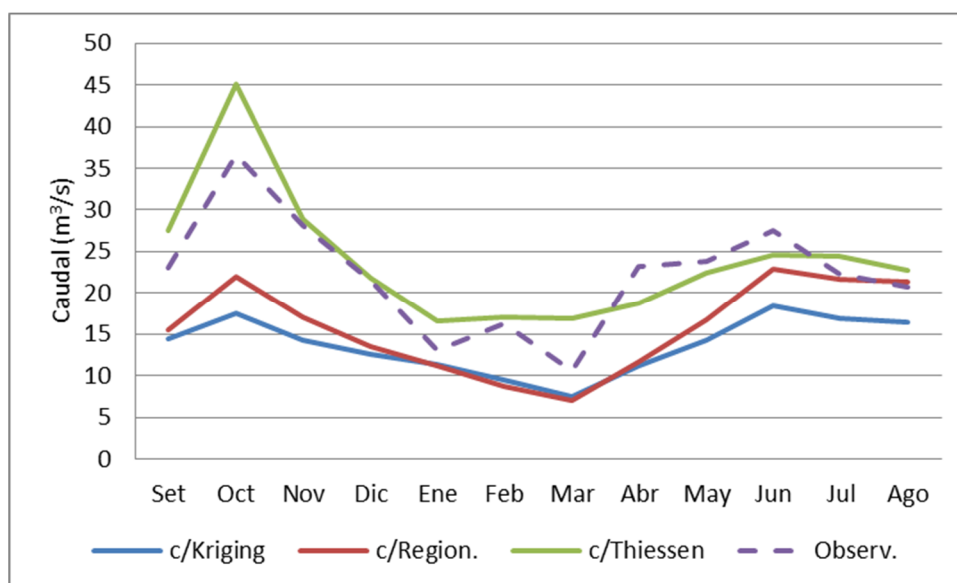


Figura 59. Hidrogramas A° Paranay en El Alcazar.

En los hidrogramas del A° Paranay, los tres métodos reproducen la forma del hidrograma observado, excepto el repunte de febrero y abril que no es reflejado por ningún método.

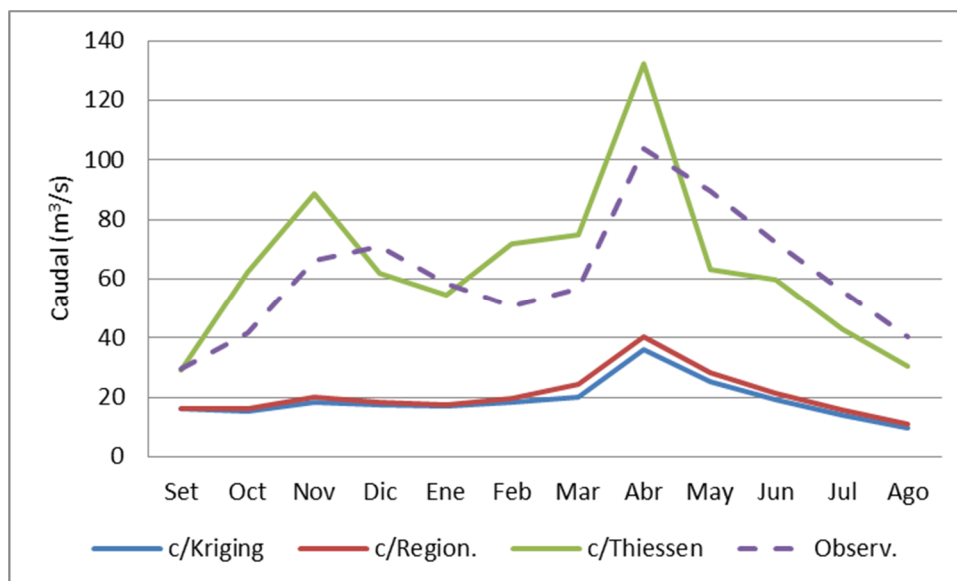


Figura 60. Hidrogramas río Santa Lucía en Santa Lucía.

En los hidrogramas del río Santa Lucía, los métodos de regionalización y kriging reproducen la forma del hidrograma observado. El hidrograma mediante Thiessen presenta algunos picos desfasados con el observado.

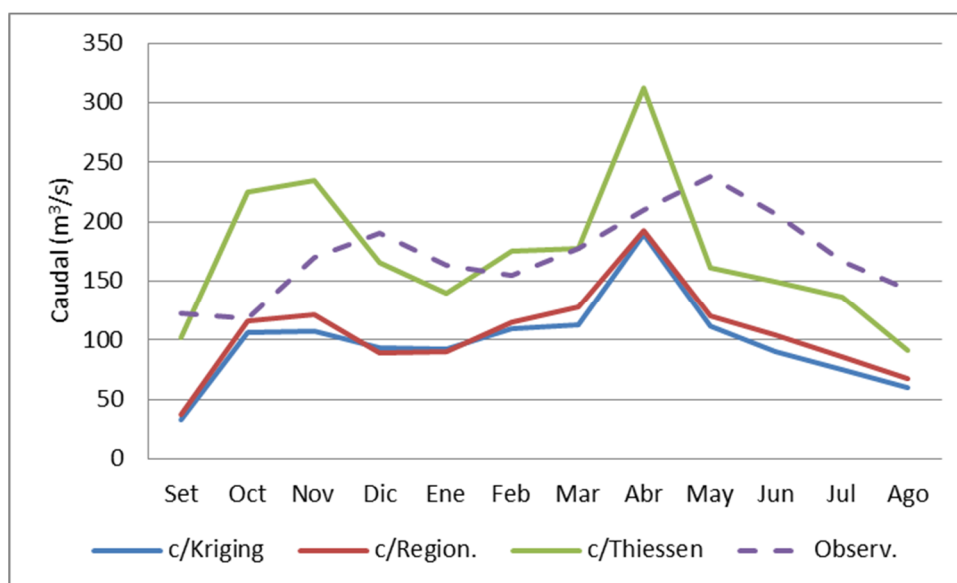


Figura 61. Hidrogramas río Corriente en Paso Lucero.

El río Corriente tiene dos secciones de aforo en su curso principal, Paso Lucero y Los Laureles aguas arriba y aguas abajo respectivamente, y además recibe, entre medio de esta dos secciones, los aportes del río Batel que también posee una sección de aforo en Paso Cerrito.

En los hidrogramas del río Corriente en Paso Lucero, los tres métodos se encuentran adelantado en un mes con respecto al hidrograma observado, manifestándose la forma de los dos picos.

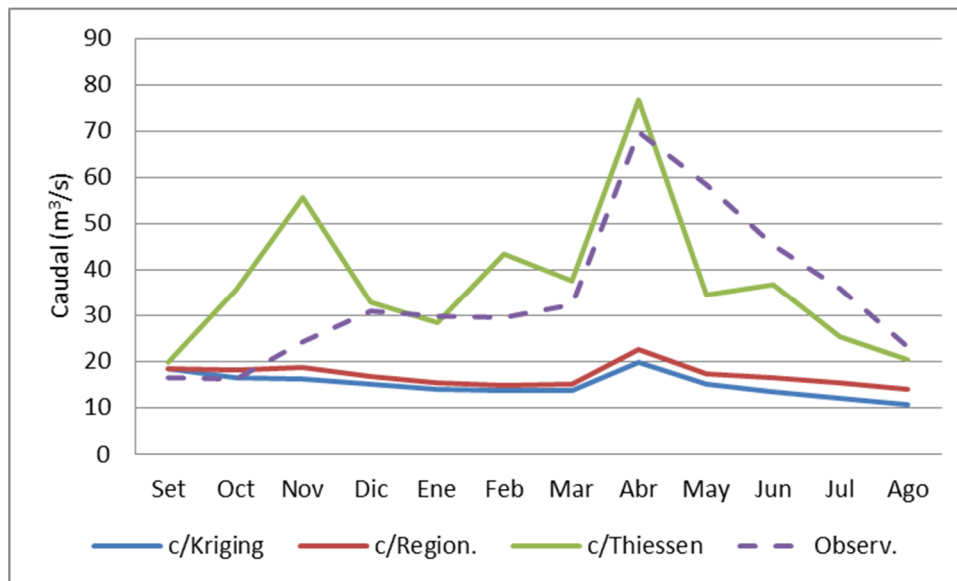


Figura 62. Hidrogramas Aº Batel en Paso Cerrito.

En los hidrogramas del Aº Batel, ninguno de los tres métodos reproduce el comportamiento del hidrograma de caudales registrados. Incluso la comparación de volúmenes, expresada como el área bajo la curva, son muy diferentes y se refleja en la magnitud de los errores de simulación. El caudal pico en abril se presenta en simultáneo en los cuatro hidrogramas, sin embargo el hidrograma derivado de usar el método de Thiessen presenta una serie de picos que no se corresponden con los observados.

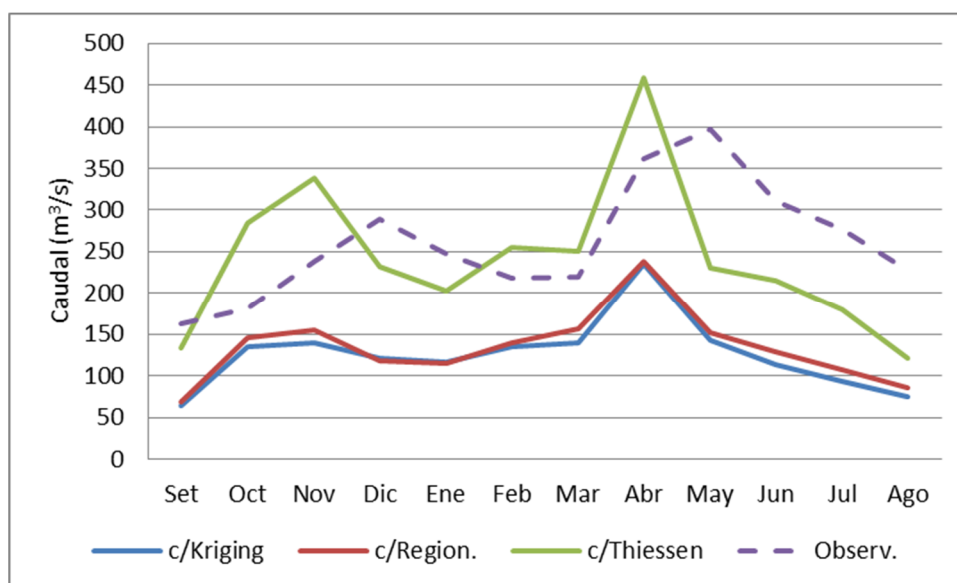


Figura 63. Hidrogramas río Corriente en Los Laureles.

En los hidrogramas del río Corriente en Los Laureles se refleja la forma de los hidrogramas simulados en Paso Lucero su adelantamiento de un mes aproximadamente. Esto es lógico, ya que es un modelo determinístico.

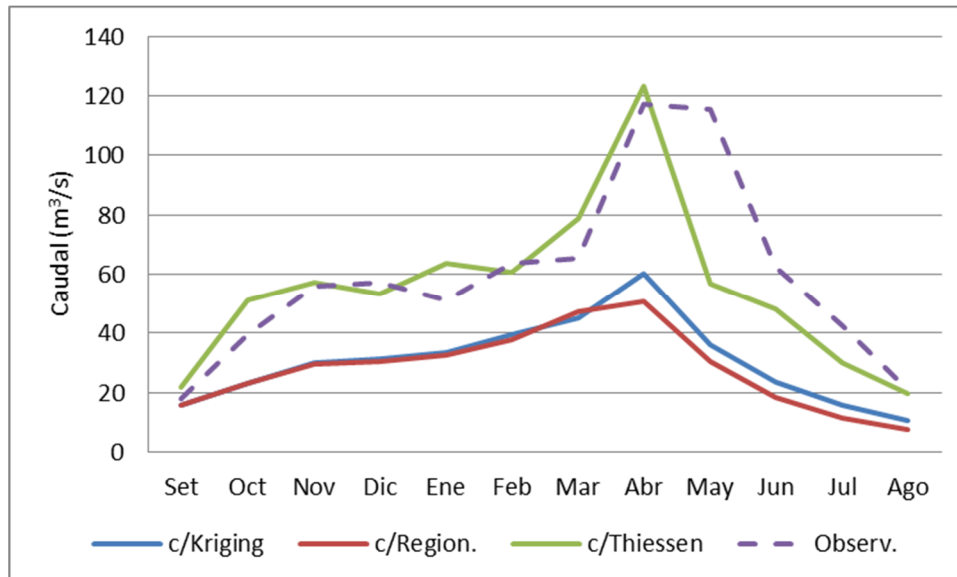


Figura 64. Hidrogramas A° Barrancas en Paso La Llana.

El A° Barrancas es un afluente del río Guayquiraró, pero la conjunción se da prácticamente a la salida de la cuenca, siendo el área de aporte del Guayquiraró el 60% del área del Barranca.

En los hidrogramas del A° Barrancas, la forma general del observado es representada por las tres simulaciones, sin embargo ninguno de los tres métodos reproduce la meseta del pico, resultando un volumen registrado mayor entre abril y agosto.

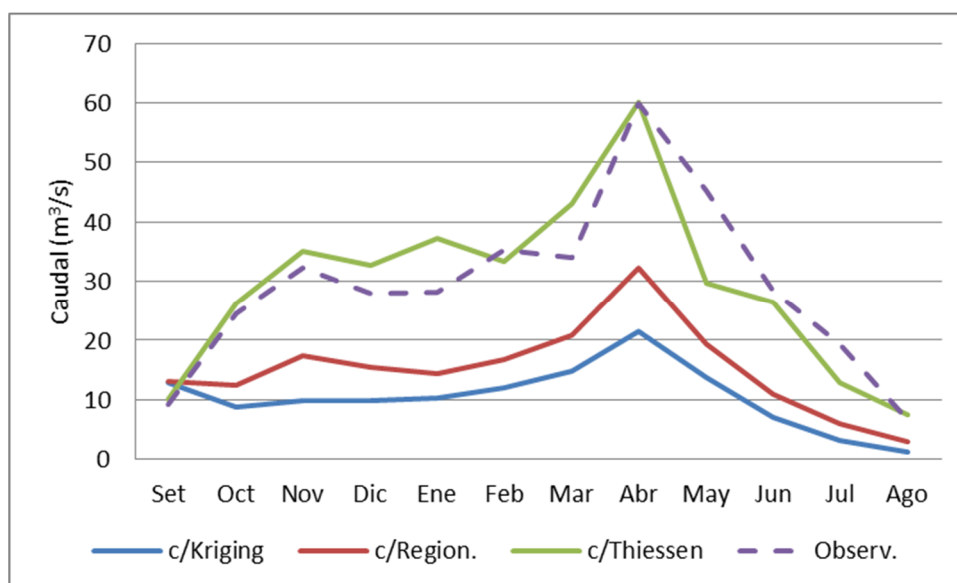


Figura 65. Hidrogramas río Guayquiraró en Paso Juncué.

En los hidrogramas del río Guayquiraró, el obtenido mediante Thiessen se ajusta aceptablemente al observado, y los volúmenes entre ambos prácticamente se compensan. Se presenta para todos los hidrogramas la misma meseta entre los meses de noviembre y febrero que para el A° Barrancas.

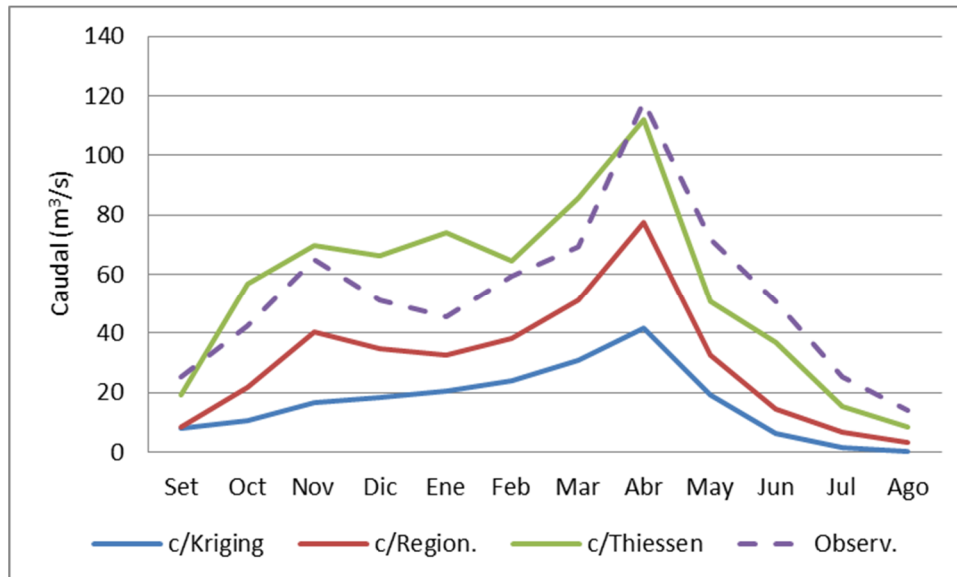


Figura 66. Hidrogramas A° Feliciano en Paso Medina.

En los hidrogramas del A° Feliciano, las tres simulaciones reproducen al observado, excepto el obtenido mediante Thiessen en el mes de enero, que presenta un pico en lugar de un valle. Para el hidrograma derivado de Thiessen la compensación de volúmenes con el observado minimiza los errores. Para ésta cuenca los hidrogramas obtenidos mediante regionalización y kriging acompañan mejora la forma del hidrograma observado.

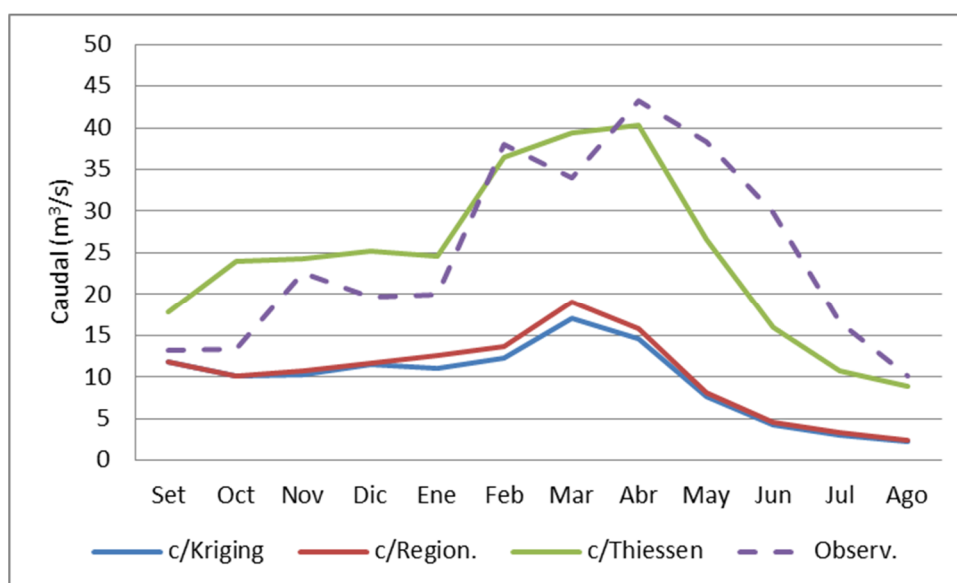


Figura 67. Hidrogramas A° Nogoyá en RP11.

En los hidrogramas del A° Nogoyá, el registrado presenta tres picos, noviembre, febrero y abril, que no pueden ser simulados correctamente. El ajuste, en relación a la forma, por ninguno de los hidrograma simulados es bueno.

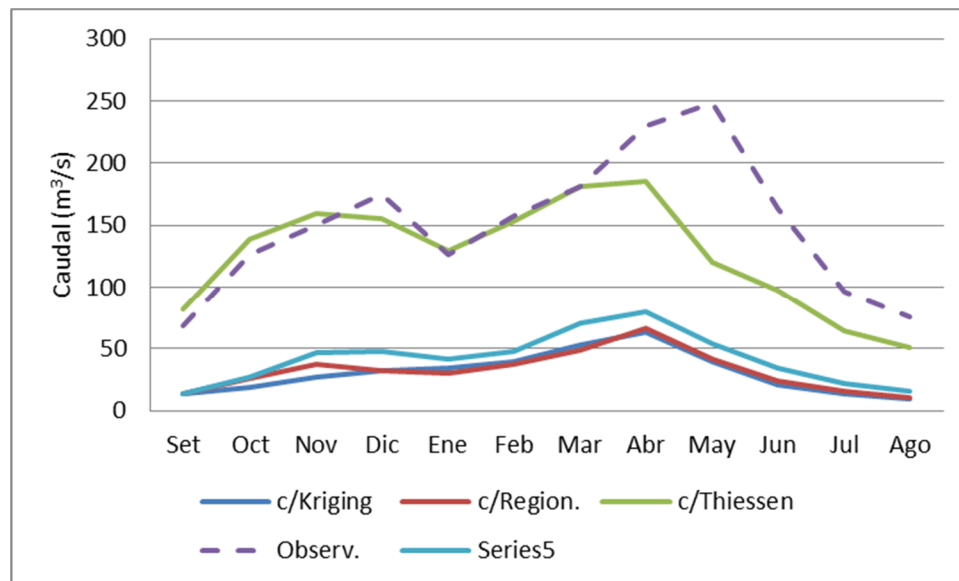


Figura 68. Hidrogramas río Gualaguay en Rosario del Tala.

En los hidrogramas del río Gualaguay, las formas se acompañan de setiembre a marzo. De marzo hasta agosto el observado supera los valores de los simulados.

Para todas las cuencas, en los hidrogramas derivados de usar regionalización o kriging se subestiman los caudales medios mensuales con respecto a los observados, por este motivo los análisis anteriores sólo se refieren a las formas de los hidrogramas y a la presentación de los tiempos al pico, pero no a sus magnitudes.

En las Tablas 40 a 42 se presentan los porcentajes entre los caudales medios mensuales observados y los simulados empleando los métodos de Thiessen, regionalización o kriging, respectivamente, obtenidos a partir de la conocida Ecuación 7 que estima el error relativo.

Tabla 40. Error relativo (%) entre caudales medios mensuales observados y simulados usando método Thiessen.

Río	Lugar	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Piray Miní	V. Hermoso	-17.8	-2.1	-9.5	-23.3	-21.8	-8.5	-26.4	-10.5	-0.8	-8.3	-11.2	-46.6
Piray Guazú	Pinar Ciba	-41.2	-16.6	0.4	-10.1	-7.8	-18.2	-12.6	4.4	-17.8	-9.6	-25.4	-34.1
Paranay	El Alcázar	-19.4	-23.3	-3.1	-1.4	-28.2	-5.5	-58.8	18.8	5.5	10.6	-10.1	-9.7
Santa Lucía	Santa Lucia	2.2	-50.1	-34.6	13.0	6.5	-41.7	-31.8	-27.6	29.2	17.7	23.3	24.2
Corriente	Paso Lucero	17.0	-90.4	-38.3	12.8	14.3	-13.4	0.0	-49.0	31.9	27.5	18.1	36.5
Batel	P. Cerrito	-20.5	-120.1	-128.6	-6.2	3.9	-47.4	-16.7	-10.0	40.6	18.7	29.2	12.3
Corriente	Los Laureles	18.5	-57.0	-41.7	19.7	17.9	-16.3	-14.5	-26.9	41.9	30.7	35.0	46.6
Barrancas	P. La Llana	-21.9	-28.8	-2.3	7.0	-24.7	4.8	-20.2	-5.1	50.9	22.9	29.1	6.2
Guayquiraró	P. Juncué	-11.5	-7.5	-9.0	-17.0	-32.4	5.6	-27.0	-0.3	34.4	6.8	33.2	-16.2
Feliciano	P. Medina	23.8	-32.4	-7.7	-29.4	-62.0	-9.0	-23.4	5.5	29.3	27.7	40.0	41.8
Nogoyá	R. Pcial 11	-35.6	-79.0	-7.1	-28.0	-23.2	4.3	-15.9	6.7	30.6	46.6	35.3	13.4
Gualeguay	R. del Tala	-19.8	-9.3	-5.7	11.4	-2.5	2.8	-0.3	19.2	51.8	40.6	33.3	33.7

Tabla 41. Error relativo (%) entre caudales medios mensuales observados y simulados usando método de regionalización.

		Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Piray Miní	V. Hermoso	60.9	45.0	25.0	29.4	21.2	47.3	34.9	31.2	32.4	14.6	-19.6	-15.8
Piray Guazú	Pinar Ciba	49.3	38.4	39.1	43.0	35.9	48.8	49.3	53.3	40.4	25.8	-16.4	-2.7
Paranay	El Alcázar	32.5	40.0	39.3	37.3	13.8	45.8	34.0	49.9	29.8	16.7	2.2	-3.1
Santa Lucía	Santa Lucia	44.8	60.7	69.3	74.0	70.1	61.3	57.2	61.1	68.4	70.5	72.0	72.8
Corriente	Paso Lucero	69.5	2.0	28.7	53.0	45.1	25.8	28.4	8.0	49.5	49.5	48.2	53.1
Batel	P. Cerrito	-12.1	-12.0	23.1	45.7	48.5	49.9	53.2	67.6	70.3	63.6	57.2	39.0
Corriente	L. Laureles	58.2	19.0	35.0	59.2	53.8	35.9	28.7	33.9	61.7	58.2	61.2	62.6
Barrancas	P. La Llana	13.0	41.5	47.0	46.9	36.2	40.9	27.7	56.5	73.5	70.6	72.9	63.7
Guayquiraró	P. Juncué	-43.4	49.1	46.0	44.6	48.7	52.5	38.3	46.2	57.5	61.8	69.4	54.6
Feliciano	P. Medina	66.0	48.5	37.9	32.1	28.4	35.2	26.3	34.3	54.5	71.7	74.1	77.9
Nogoyá	R. Pcial 11	10.1	23.8	52.4	40.9	37.3	64.2	44.0	63.4	78.9	84.7	80.1	76.0
Gualeguay	R. del Tala	80.4	79.5	74.9	81.6	75.8	76.3	72.8	70.9	83.2	85.7	84.0	85.8

Tabla 42. Error relativo (%) entre caudales medios mensuales observados y simulados usando método de kriging.

		Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Piray Miní	V. Hermoso	71.3	59.7	41.0	36.4	22.5	46.1	44.1	49.1	46.1	40.0	27.3	26.2
Piray Guazú	Pinar Ciba	49.6	55.9	55.5	53.8	44.7	56.5	61.4	68.9	60.5	58.2	40.4	45.6
Paranay	El Alcázar	37.2	52.2	49.0	41.6	12.3	41.1	29.4	51.6	40.2	33.0	24.2	20.8
Santa Lucía	Santa Lucia	44.8	63.1	72.0	75.3	70.8	63.8	64.7	65.1	71.5	73.4	74.9	75.8
Corriente	Paso Lucero	73.2	10.3	36.5	51.0	43.6	28.9	36.7	9.6	53.1	56.2	55.0	58.3
Batel	P. Cerrito	-12.1	-3.2	33.2	51.4	52.8	53.7	57.8	71.7	73.9	70.1	66.5	53.3
Corriente	L. Laureles	61.0	25.0	41.4	58.0	52.7	38.0	36.5	35.0	64.1	63.3	66.2	67.1
Barrancas	P. La Llana	12.0	42.1	46.4	45.0	34.0	38.0	30.8	48.4	68.6	61.9	63.0	50.0
Guayquiraró	P. Juncué	-41.6	63.8	69.5	64.9	63.3	66.1	56.5	64.1	69.6	75.5	83.5	80.2
Feliciano	P. Medina	67.3	75.5	74.5	63.9	54.8	59.7	55.5	64.7	73.4	87.6	93.0	97.3
Nogoyá	R. Pcial 11	10.1	24.7	54.4	41.5	44.8	67.7	49.6	66.5	80.1	85.6	81.5	77.6
Gualeguay	R. del Tala	80.4	85.6	82.0	81.7	72.8	74.8	70.7	72.2	84.1	87.1	86.3	87.9

De los gráficos y las tablas precedentes se desprende, que los errores en los métodos de Thiessen son por defecto o por exceso, mientras que para los métodos de regionalización o kriging, siempre son por defecto, alcanzando valores superiores al 40% en muchas cuencas casi todos los meses.

En particular la cuenca del río Batel tiene errores por defecto de más del 100 % mediante Thiessen, pero no tan importantes en los otros dos métodos. Para regionalización, las cuencas que presentan los mayores errores son las del río Gualaguay y Santa Lucía; mientras que para kriging, a las dos anteriores, se les suman Feliciano, Guayquiraró y Nogoyá.

Los meses en que se manifiestan los máximos errores para los hidrogramas derivados por método de Thiessen son octubre y noviembre por defecto, y mayo por exceso. Mientras que para los de regionalización y kriging se presentan en los meses de invierno por exceso. La referencia por defecto o por exceso es con respecto al caudal observado medio mensual.

Durante la modelación, los parámetros adoptados para la calibración respondieron a las características geomorfológicas de las cuencas, ya mencionados en el capítulo 1, de los cuales se subrayan:

La provincia de Misiones es atravesada por una dorsal con sentido SO-NE que sirve de divisoria de aguas, resultando hacia el este aportes al río Uruguay y al oeste aportes hacia el río Paraná. Las principales características de este territorio son las selvas, el clima húmedo y los accidentes del relieve (Martínez, 2009a). Por lo tanto, en las cuencas misioneras, existe una alta densidad de drenaje, con numerosos cursos de corto recorrido, gran pendiente, alta interceptación foliar, y por lo tanto alto almacenamiento inicial y elevada evapotranspiración, lo que se manifiesta en una rápida respuesta en la transformación lluvia a caudal, en erosión fluvial, pudiendo presentar sequías en los meses de verano.

Más al sur de la provincia de Misiones el terreno se va aplanando, descendiendo de este al oeste en forma escalonada. Se presenta entonces, la terminación de la meseta misionera en el ángulo noreste (200 msnm) y un área localizada en el centro sur de la provincia de Corrientes, que funciona como divisoria hidrográfica de los aportes a los ríos Paraná y Uruguay, con cotas máximas de aproximadamente 130 msnm. En contraposición, se ubica en el sector central con límites en parte poco nítidos, un área sub-negativa con gran desarrollo de humedales, correspondiente a la región del Iberá.

En el caso de las cuencas de la provincia de Corrientes, es de destacar que la utilización de la variable topográfica para la delimitación de unidades hídricas superficiales resulta insuficiente debido a la variedad de formas de escurrimiento o almacenamiento del agua, sumada a la

existencia y diversidad de humedales, desarrollados sobre extensas áreas carentes o con escasa expresión de relieve (Giraut et al., 2009). En resumen, menor pendiente y valle de inundación extendidos, cauces entrelazados, bañados y esteros lo que provocan, para ciertos meses, caudales simulados menores, respecto a los observados.

En la provincia de Entre ríos, se presenta un relieve con dos zonas bien diferenciadas, la región de las lomadas entrerrianas y la región del Delta del Paraná. Las lomadas entrerrianas que extienden en sentido norte- sur, de baja altura, alrededor de los 100 msnm, chatas y anchas, sobre el suelo de composición arcillosa. Estas lomadas se bifurcan en forma de horqueta hacia el sur y constituyen divisorias de aguas que conforman las vertientes hacia el Paraná y el Uruguay. La región del Delta del Paraná está ubicada al sur de la provincia, es una zona deprimida, formada por ríos, riachos y arroyos y gran cantidad de islas, que son distribuidas entre las provincias de Entre Ríos, Buenos Aires y Santa Fe.

Las cuencas nortes de la provincia de Entre Ríos, son más típicas, con pendientes que van de los 0.3 a los 0.07 m/km, con cauces más definidos, pero con respuestas más francas, producto de suelos impermeables. Lo que se refleja en un mejor ajuste de los picos entre los hidrogramas observados y simulados, excepto para la cuenca del río Gualeguay. Esta cuenca ocupa el 30% del territorio de la provincia de Entre Ríos, cuyo río principal tiene una extensión aproximada de 486 km, recorre el área central de la provincia y es una zona con actividades agrícola-ganaderas importantes, ya que posee más del 20% de la población provincial. Los caudales del río Gualeguay son originados por lluvias en la parte norte y centro de la cuenca; la parte sur de la misma tiene muy poca influencia y su aporte no es significativo respecto al caudal producido en los tramos medios y superior. A esto debe agregarse el tipo de suelo netamente arcilloso, de rápida saturación y la franca pendiente del terreno hacia la red de drenaje, que facilita las descargas hacia el río. (Martínez, 2009b). Los problemas para lograr una mejor calibración a esta cuenca entre abril y agosto pueden ser atribuidos a la alta antropización que se manifiesta en la misma, lo que complejiza el uso de los parámetros para representar las variabilidades presente en la misma, como así también a déficits en los registros de lluvias.

En relación a los hidrogramas de las Figuras 57 a 68, se resume:

- Las cuencas de los ríos Piray Miní, Piray Guazú y Paranay se encuentran en la provincia de Misiones donde, como ya se mencionó, el relieve es importante, con pendientes del orden del uno por mil. La tres presenta los caudales pico en el mes de octubre y un segundo pico en el mes de junio.
- Las cuencas de Misiones son las que menores errores de caudales presentan en los tres métodos de estimación de campos areales.

- Las nueve cuencas restantes (que se encuentran en las provincias de Corrientes y Entre Ríos), presentan características diferentes en cuanto al relieve, vegetación, suelos. y a la predominancia de almacenamiento en sus áreas. En estas cuencas el caudal pico ocurre en abril, con un segundo pico, en diciembre o noviembre, hasta incluso un repunte en el mes de febrero.
- La forma de los hidrogramas observados de las cuencas correntinas se representan mejor con los hidrogramas donde se usaron los campos de precipitación y ETP de regionalización o kriging, posiblemente porque son campos medios que representan mejor los almacenamientos de esas cuencas.
- En particular se destaca que las simulaciones del río Corriente presentan un adelanto en relación a los caudales registrados. Esto se debe a que recibe la influencia de la laguna del Iberá, efecto que no ha sido considerado en la modelación. A pesar de este desfase de caudales, se presentan los hidrogramas para mostrar también en esta cuenca la respuesta de la modelación.
- Algo similar ocurre en la cuenca del río Gualeguay, ubicado en Entre Ríos, pero en éste caso no es por efecto del almacenamiento, sino por la alta antropización de esa cuenca.

En relación a métodos de estimación de la Precipitación y la ETP areal, se sintetiza:

- En caso que se quieran emplear los campos de precipitación y de ETP, obtenidos mediante metodologías de regionalización o de kriging, como series de tiempo, se deberán calcular año por año los valores mensuales y con ellos aplicar el modelo.
- Surge entonces el interrogante de si esto es conveniente. Dependerá del objetivo perseguido, pero para el caso de mejorar las estimaciones de caudales sólo se justifica si la disponibilidad de tiempo y de herramientas tecnológicas son abundantes,
- El método de Thiessen es en éste caso el menos laborioso y el que mejores resultados alcanzó. Es éste un método ampliamente aplicado y que se sigue recomendando a la luz de los resultados obtenidos

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del desarrollo de la presente Tesis se considera que los objetivos propuestos han sido satisfactoriamente alcanzados, ya que se logró analizar e incorporar la variabilidad de las componentes del balance hídrico en las modelaciones para la determinación de la oferta de agua.

- La variabilidad espacial fue analizada definiendo regiones homogéneas por análisis estadístico multivariado (agrupamiento por método Ward) y por L-momentos para los campos medios de precipitación y evapotranspiración. Los resultados fueron muy similares entre ambos, por lo que usar cualquiera de los métodos para definir las regiones homogéneas no introduce diferencias. Dado que se trata de técnicas automáticas, es conveniente contrastar la decisión de la cantidad de regiones a definir basado en el conocimiento de los factores que determinan los regímenes y la precaracterización de la variable en análisis. En el caso del análisis de agrupamiento se pueden ir definiendo diferentes niveles de corte y ver la conformación de los grupos. En el caso de L-momentos se requiere definir a priori una cantidad de grupos, lo cual introduce más incertidumbre. En este desarrollo se han definido la cantidad de grupos con el método de agrupamiento y luego se ha utilizado la misma cantidad en L-momentos para validar los resultados.
- En síntesis, con ambos métodos de regionalización prácticamente se definen las mismas regiones, lo que permite adoptar cualquiera de ellos para realizar el cálculo de la precipitación y evapotranspiración potencial areal de las subcuencas. Los grupos definidos presentan valores anuales entre 800 y 2000 mm para la precipitación y entre 950 y 1300 mm para la evapotranspiración potencial. El gradiente disminuye de este a oeste como es característico con la precipitación y en relación a la ETP los grupos no presentan un patrón definido.
- La variabilidad temporal, fue analizada mediante análisis estadístico de las series de tiempo, para identificar la existencia de tendencias, y períodos de cambios. Estas situaciones no se manifestaron en el período considerado (1970-2010), ya que si bien se presenta un conjunto de años con precipitaciones por encima o por debajo de la media, los mismos corresponden a la variabilidad natural de los fenómenos climáticos.
- Para obtener campos de precipitación y evapotranspiración mensual se consideraron los métodos de polígonos de Thiessen y kriging. El primero es más simple de implementar, pero es el que ofrece un resultado más geométrico, ya que se asignan los pesos a las estaciones en función a su ubicación relativa, la distancia entre ellos, y el

porcentaje resultante en relación al área total de la cuenca, sin la consideración de las características físicas del terreno adyacente, la naturaleza de la variable y si existe otra función de relación espacial que no sea el modelo lineal. . En el segundo, en cambio, se analiza la estructura de variación espacial, donde se obtiene una función que refleja la distancia máxima y la forma en que un punto tiene influencia sobre otro punto a diferentes distancias para representar este comportamiento (variograma), y que no necesariamente es lineal. Este variograma no sólo permite la interpolación por kriging sino que su forma y parámetros aportan información sobre el comportamiento de la estructura espacial de la variable en estudio

- De las técnicas aplicadas, el grado de complejidad, en relación a la metodología de cálculo y a su implementación, aumenta desde los polígonos de Thiessen, agrupamiento a kriging. No obstante con la tecnología actualmente disponible se pueden conformar los campos con bastante facilidad, aunque a la hora de decidir cuál método utilizar para determinar los campos de precipitación y evapotranspiración, sin duda a igual esfuerzo se sigue el principio de la parsimonia.
- Las modelaciones realizadas han permitido concluir que los hidrogramas en la mayoría de las cuencas reproducen el comportamiento medio mensual, excepto para la cuenca del río Corrientes y el río Gualeguay que como se sabe el primero reciben la influencia de la laguna del Iberá, efecto de almacenamiento, y el segundo la influencia antrópica, difícil de representar en modelos de balances convencionales.
- En relación a la magnitud, las diferencias entre los caudales estimados mediante la modelación de las series de tiempo y los obtenidos con los valores promediados son muy grandes. En el primer caso el ajuste es aceptable y los errores en promedio se ven compensado por los volúmenes. En cambio para el segundo caso, las diferencias son de hasta un 80 % por defecto con relación a los caudales registrados, lo que permite confirmar que al regionalizar se promedia el comportamiento del fenómeno. Se concluye por lo tanto, que son irremplazables las modelaciones por serie de tiempo.
- Se comprueba entonces que no se evidencia un mejor ajuste de los hidrogramas con respecto al observado, como resultado del incremento de la complejidad del método para la obtención de campos de precipitación y de ETP areal, como el de kriging aplicado a valores promediados.
- Un párrafo aparte merece la consideración del tipo de errores que pueden estar presentes en los resultados, ya sean los inherentes en los datos, los propios de los métodos o los inducidos por el modelo. Es por ello que se procedió a analizar convenientemente los datos observados, utilizar siempre el mismo modelo de balance, con los mismos parámetros obtenidos en la calibración, y a no cambiar la base de

datos utilizadas para la determinación de los campos, para evitar incorporar incertidumbre en los cálculos.

- La recomendación que surge es aplicar los método regionalización y de kriging a las series de tiempo, en lugar de usar series con valores mensuales promediados. Sin duda esto sería muy laborioso y se necesitaría un gran procesamiento de mapas y de datos, pero con el avance de la informática las técnicas se podrían programar. Un ambiente de Sistema de Información Geográfica (SIG) sería ideal para este procesamiento. No se recomienda sin embargo usarlo sin ayuda de alguna herramienta informática que automatice los procesos, ya que insumiría mucho tiempo que no es conveniente invertir en caso que los resultados no mejoren.
- Los resultados encontrados permiten destacar la importancia de contar con datos hidrometeorológicos uniformemente distribuidos en el espacio, recomendando una red densa para minimizar los errores de interpolación. Estos datos puntuales, empleados en técnicas Geoestadísticas, permiten generar campos de precipitación y evapotranspiración, infiriendo información en sitios sin registros, que junto con el conocimiento de las características físicas de las cuencas, mediante balances, posibiliten extender las simulaciones de caudales a cuencas no aforadas.
- El uso de modelos de balances a paso de tiempo mensual resulta suficiente para el conocimiento estacional de la oferta y una forma sencilla de cuantificarla.
- La oferta hídrica mensual estimada mediante balances hidrológicos resulta una valiosa herramienta al momento de planificar y gestionar las cuencas, en especial para la Cuenca del Plata que proporciona agua para usos tan variados como la navegación, agrícola, pecuario, humano, energético, industrial, pesquero, recreativo y como receptor de efluentes industriales y domésticos.
- Se sugiere continuar con la investigación incorporando a la generación de campos areales, de regionalización y de kriging, la consideración de series de tiempo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo-Vera, C.; Keesman, KJ.; Mels, AR.; Rijnaarts, HHM. 2013. Evaluating the potential of improving residential water balance at building scale. *Water Research*, Elsevier. Vol. 4, Issue 20, pp. 7287-7299.
- Araújo de Almeida, M. y Curi, WF. 2016. Gestão do uso de água na bacia do Rio Paraíba, PB, Brasil com base em modelos de outorga e cobrança. *Rev. Ambient. Água* vol.11 Nº.4 Taubaté.
- Barbosa Landim, P. 1997. *Análise Estadística de dados geológicos*. UNESP Editora. San Pablo, Brasil. 226 pp.
- Barros, V.; Clarke, R. y Silva Días, P. (Ed). 2006. *El cambio climático en la Cuenca del Plata*. CONICET. 232 pp. ISBN 950-692-066-4.
- Cacik, P.; Hämmerly, R; Morasi, G.; Gagliardi, MP. 2013. Identificación de potenciales nuevas áreas de regadío y áreas de riego complementario en las cuencas de la zona nordeste de Argentina. *Caracterización de los recursos hídricos superficiales*. Informe Final. FAO-UN; PROSAP; CRL-INA. Santa Fe, Argentina. 165 pp.
- Carrera, J. y Samper, J. 1985. *Apuntes del Curso sobre métodos geoestadísticos aplicados a la Hidrología Subterránea*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos de Valencia.
- Carvajal Escobar, Y. y Segura, J.M. 2002. Aplicación de métodos estadísticos para la regionalización de precipitación mensual en el Valle del Cauca. *Meteorología Colombiana*, (5): 13-21. ISSN-0124-6984.
- Castro Heredia, L.M.; Carvajal Escobar, Y. y Ávila Díaz, A.J. 2012. Análisis cluster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, núm. 11: 11-20. Universidad del Valle Cali, Colombia.
- CEDEX. 2012. *Manual de Usuario CHAC*. Madrid, España. 76 pp.
- Chow, V.T.; Maidment, D. y Mays, L. 1996 *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Santa Fe de Bogotá, 584 pp.
- Cortéz, A.; Ovalles, F.A.; Rodríguez, M.F.; Rey, J.C. y Núñez, M.C. 2005. Análisis geoestadístico de la variabilidad temporal, a una escala anual y mensual, de parámetros climáticos en un campo experimental, estado Aragua, Venezuela. *Agronomía Trop*, 55 (3): 327-342.
- Cruz Flores R. 2009. *Compitiendo por el agua: Entendiendo el conflicto y la cooperación en la gobernanza local del agua*. Valoración de los recursos hídricos del Municipio de Tiraque. Estudio hidrológico de la micro-región Tiraque Valle. Informe Final. Centro AGUA- UMSS. Cochabamba, Bolivia. . 89 pp.

- Damilano, G. y Paris, M. 2014. Apuntes del Curso Geoestadística. Maestría en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba Argentina. 18 pp.
- Daniele, C. y Natenzon, C. 1994. Las Regiones Naturales de la Argentina: Caracterización y Diagnóstico. En El Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la Argentina. Diagnóstico de su Patrimonio y su Desarrollo Institucional.
- Daniele, C.; Burkart, R.; Del Valle Ruiz, L.; Natenzon, C. y Ardura, F. 1971. Cuenca del Río de la Plata, estudio para su planificación y desarrollo. Inventario y análisis de la información básica sobre recursos naturales Buenos Aires. Argentina. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington D.C.
- Darand, M. y Daneshvar, M.R. 2014. Regionalization of precipitation regimes in Iran using principal component analysis and hierarchical clustering analysis. *Environmental Processes*, 1(4): 517-532.
- Demey, R. J. y Pradere, R. 1996. Generación de isolíneas de precipitación al sur del Estado de Aragua-Venezuela usando kriging con tendencia externa. *Agronomía Tropical*, 46(3): 313-333.
- Fassnacht, S.R. y Derry, J.E. 2010. Defining similar regions of snow in the Colorado River Basin using self-organizing maps, *Water Resources Research*, 46, W04507, doi:10.1029/2009WR007835
- Giovannettone, J. y Wright, M. 2013. *ICI-WaRM Regional Analysis of Frequency Tool (ICI-RAFT). Users Manual*. Institute for Water Resources (IWR), United States Army Corps of Engineers (USACE), USA, 48 pp.
- Giraut, MA.; Rujana, M y Valladares, A. 2009. El rol de los humedales en el contexto evolutivo de la red hídrica superficial de la provincia de Corrientes, República Argentina. Sistema Nacional de Información Hídrica, Subsecretaría de Recursos Hídricos, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Instituto Correntino del Agua y del Ambiente (ICAA). 10 pp.
- Guerra, F.; Gómez, H.; González, J. y Zambrano, Z. 2006. Uso actual de métodos y técnicas para el estudio de la precipitación incluyendo plataformas SIG. *Geoenseñanza*, 11(1): 97-106.
- Hammer, Ø.; Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1), 9 pp.
- Hämmerly, R. 2012a. Antecedentes de balance hídrico en Cuenca del Plata. (Argentina). Informe Final Subcomponente II.1 Balance Hídrico Integrado, 68 pp.
- Hämmerly, R. 2012b. Listado de información nacional potencialmente disponible para el balance hídrico a nivel Cuenca del Plata (Argentina). Informe Final Subcomponente II.1 Balance Hídrico Integrado. CIC-Plata, 46 pp.
- Hämmerly, R.; Paris, M. y Paoli, C. 2012c. Análisis de la estructura espacial de una tormenta con métodos geoestadísticos. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.

- Hämmerly, R.; Cacik, P.A.; Bertoni, J.C.; Ingaramo, R.; Cioccale, M.; Menajovsky, S.; Vergini, E.; Bernal, G.; Monteverde, C. y Gagliardi, M.P. 2014. Balance hídrico superficial de la Cuenca del Plata en territorio Argentino (Parte A). Informe Final Subcomponente II.1 Balance Hídrico Integrado. CIC-Plata, 272 pp.
- Hosking, J.R.M. 1992. Moment or L-Moment? An example comparin two measures of distributional shape. The American Statitician Asociation, August. 46 (3): 186-188.
- Hosking, J. y Wallis, J. 1997. Regional Flood Frequency Analysis: an Approach based on Lmoments, Cambridge University Press, New York, 245 pp.
- IGME. 2008. Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración. Serie Riesgos Geológico/Geotecnia. Madrid. 190 pp. ISBN 978-84-7840-770-5.
- INTA. 1995. Atlas de Suelos de la República Argentina. [CD]. Fundación ArgenInta y Aeroterra.
- Íñiguez Covarrubias, M.; Ojeda Bustamante, W.; Díaz Delgado, C.; Mamadou Bâ, K.; y Mercado Escalante, R. 2011. Análisis metodológico de la distribución espacial de la precipitación y la estimación media diaria. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2 (1): 57-69.
- IPCC. 2001. Tercer Informe de Evaluación Cambio climático 2001. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM. PNUMA. 93 pp.
- Iriondo, M.H. 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America). Geomorphology, (7): 289-303.
- Izquierdo, T. y Márquez, A. 2006. Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). Geogaceta, (40): 307-310.
- Kuiper, F.K. y Fisher, L. 1975. A Monte Carlo Comparision of six Clustering Procedures Biometrics, (31): 777-783.
- Machado Pontes, L.; Coelho, G.; Rogério de Mello, C.; Marciano da Silva, A.; Oliveira, GC. y Ribeiro Viola, M. 2016. Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial. Rev. Ambient. Água vol. 11 Nº 4 Taubaté.
- Martínez, SJ. 2009a. Cuenca de arroyos de Misiones afluentes al río Paraná. Cuenca Nº12. SSRH. 7 pp.
- Martínez, SJ. 2009b. Cuenca del río Gualeguay. Cuenca Nº34. SSRH. 7 pp.
- Matheron, G. 1971. The theory of regionalized variables and its applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Nº 5, Ecole des Mines de Paris, France. 211 p.
- Mejía, J.F.; Mesa, O.; Poveda, G.; Vélez, J.I.; Hoyos, C.D.; Mantilla, R. y Botero, B. 1999. Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. DYNA Revista de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, (127): 7-24.
- Mezher, R.N. y Mercuri, P.A. 2009. Análisis geoestadístico de la distribución de eventos de granizo en Argentina. Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y

- Geodestas. 24. Taller de Trabajo de Estaciones Continuas GNSS de América y del Caribe. 1. 2009 04 14-17, Mendoza, AR.
- Molina Carpio, J. y Espinoza Romero, D. 2006. Balance hídrico de la cuenca alta del río Pilcomayo. Instituto de Hidráulica e Hidrología. UMSA. La Paz, Bolivia, 130 pp.
- Nasonova, ON. 2012. The effect of uncertainties in precipitation global datasets on the estimates of terrestrial water balance components. *Water Resources*, Vol. 39, No. 1, pp. 56–68. ISSN 00978078
- Nouvelot, J.F.; Le Goulven, P.; Alemán, M. y Pourrut, P. 1995. Análisis estadístico y regionalización de las precipitaciones en el Ecuador. *El agua en el Ecuador: Clima, precipitaciones, escorrentía. Estudios de Geografía*, 7: 27-66.
- Ostroumova, L.P. y Polonskii, V.F. 2015. Studying the spatiotemporal variability of the components of the North Caspian Sea water balance using the water balance model. *Russian Meteorology and Hydrology* vol. 40 N° 4, pp.269-277. ISSN 1068-3739.
- Paoli, C., 2000. Conceptos básicos sobre hidrología y recursos hídricos. Apuntes de Cátedra de Hidrometeorología. Facultad de Cs. Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, 26 pp.
- Paoli, C. y Scherider, M. (Ed.) 2000. *El río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*. Centro de Publicaciones UNL. Tomo 1. ISBN: 987-508-121-3. 309 pp.
- Paris, M. y Zucarelli, G.V. 2004. Regionalización de caudales. Propuesta metodológica para la identificación de regiones homogéneas. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XIX, Num 4: 5-19.
- Pedraza, R.; Morresi, MV.; Pusineri, G. y D'Elia M. 2010. Efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos en la región Litoral-Mesopotamia (Argentina). *Ingeniera del Agua*, Vol. 17, No 2, Junio 2010. Pp. 103-117. ISSN: 1134–2196.
- Pineda Contreras, N.; Arellano Godoy, R.; Becerra Sánchez, L.; Aular Villegas, M. E.; Azuaje Valera, M.; Pimentel Mendoza, J. y Jaimes Cárdenas, E. 2011. Caracterización climática de la microcuenca del Río Monaicito, subcuenca del Río Motatán-Carache. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(5): 765-771.
- Quantum GIS Development Team. 2017. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Version 2.18. Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- Soldano, F.A. 1947. Régimen y aprovechamiento de la red fluvial Argentina. Parte I: El río Paraná y sus tributarios. Editorial Címera, Bs As, 264 pp.
- Soto Benavides, M.H. 2001. Calibración de dos modelos de simulación integral de cuenca. Memoria al título de Ingeniero Forestal. Facultad de Cs Forestales. Universidad de Talca, Chile, 122 pp.
- SSRH. 2002. Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina CD-ROM, Buenos Aires.
- SSRH. 2010a. Atlas 2010. Cuencas y regiones hídricas superficiales de la República Argentina. [CD].

- SSRH. 2010b. Estadística Hidrológica 2008/2009. Red Hidrológica Nacional. Secretaria de Obras Públicas. ISBN 978-987-98869-6-0. 2 tomos.
- Terra, R. y Pisciotano, G. 1994. Regionalización del Uruguay según el ciclo anual de precipitaciones mediante "cluster análisis". Mem. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, Chile; pp. 227- 236.
- Tucci, C.E.M. (Ed.) 2000. Hidrología. Ciencia y aplicación. Universidade/UFRGS - ABRH, 2. ed Porto Alegre, Brasil, 943 pp.
- Tucci, C.E.M. 2002. Regionalização de Vazoes. Editorial de Universidades. Porto Alegre, Brasil, 256 pp.
- UNESCO. 2006. Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas. IMTA. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4, 95 pp.
- UNESCO. 2010. Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 27, 77 pp.
- Vilchis-Francés, A.Y.; Díaz Delgado, C.; Khalidou, M. y Quentin, E. 2009. Optimización de la red de estaciones pluviométricas del Estado de México. Ingeniería Hidráulica en México, 24(1): 95-108.
- Wei, S. 2012. Estimating water deficit and its uncertainties in water-scarce area using integrated modeling approach. Water Science and Engineering 5(4) 450-463. ISSN: 1674-2370
- Xue, L.; Li, L. y Zhang, Q. 2008. Hydrological behaviour and water balance analysis for Xitiaoxi catchment of Taihu Basin. Water Science and Engineering, 1(3) 44-53. ISSN: 1674-2370.
- Zucarelli, A.; Paris, M. y Macor, J. 2014 "Utilización de kriging para la elaboración de curvas isohietas de precipitación mensual en la Provincia de Santa Fe, Argentina". 2do Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Instituto Nacional del Agua (INA). Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.

Páginas WEB:

Base de datos de FAO -CLIMWAT 2.0:

http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html

Sistema Nacional de Información Hídrica: <http://www.hidricosargentina.gov.ar/>

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-USGS): <http://srtm.usgs.gov/index.php>

Instituto Geográfico Nacional (IGN): <http://www.ign.gob.ar/sig250>,

<http://www.ign.gob.ar/sig#descarga>

Software QGIS: <http://qgis.osgeo.org>.

Programa hidrológico Internacional UNESCO:

<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/ihp/about-ihp/>

EuroCLIMA:

<http://www.euroclima.org/es/euroclima>

Aquaknow:

<http://aquaknow.jrc.ec.europa.eu/>

Algunos mapas fueron creados usando ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® y ArcMap™ son propiedad intelectual de Esri y son usado bajo licencia. Visite www.esri.com.